

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

2302T010 Konstrukce strojů a zařízení

### Kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny

### Collapse of cavitation bubble near solid boundary

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor diplomové práce:	Marek Pešta
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Miloš Müller, Ph.D.– TU v Liberci
Konzultant diplomové práce:	RNDr. Milan Sedlář, CSc.

#### **Rozsah práce a příloh:**

Počet stran:	54
Počet příloh:	18
Počet obrázků:	30
Počet grafů:	24
Počet vzorců:	6

**V Liberci 15. 5 2012**



# **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení

**Marek P e š t a**

Studijní program

**magisterský - M2301    strojní inženýrství**

Obor

**3901T003 Konstrukce strojů a zařízení**

Zaměření

**Tepelná technika**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

## **Studie kolapsu kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny**

### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Proved'te podrobnou rešerši mechanismů interakce kavitační bublinky s pevnou stěnou
2. Proved'te návrh experimentu pro vizualizaci kolapsu bublinky v blízkosti pevné stěny
3. Navrhněte možnou techniku měření účinku kolapsu kavitační bublinky na pevnou stěnu
4. Proved'te experimentální měření kolapsů kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro několik různých maximálních poloměrů bublinky a několik různých vzdáleností od stěny
5. Navrhněte metodiku a proved'te vyhodnocení účinků kolapsu bublinky v blízkosti stěny
6. Proved'te vyhodnocení vlivu počátečního poloměru bublinky a její vzdálenosti od stěny na sílu bublinky směrem ke stěně
7. Zhodnoťte způsoby interakce bublinky a pevné stěny pro různé vzdálenosti bublinky od stěny

Forma zpracování diplomové práce:

- původní zpráva: 40

- grafické práce: 10

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):


- [1] NOSKIEVIČ, J., SAMEK, L., TARABA, O.:Kavitace - Diagnostika a technické využití. SNTL, Praha 1981.
- [2] FRANC, J., P., MICHEL, J., M.:Fundamentals of cavitation. Springer, 2004.
- [3] BRENNEN, CH., E.:Cavitation and Bubble Dynamics, Oxford University Press, Oxford 1995.
- [4] PLESSET, M., S., CHAPMAN, B., R.:Collapse of initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of solid boundary. J. Fluid Mech., 1970, Vol. 47, no. 2, pp. 283-290.
- [5] BLAKE, J., R., HOOTON, M., C., ROBINSON, P., B., TONG, R., P.:Collapsing cavities, toroidal bubbles and jet impacty. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A., 1997, vol. 355, pp. 537-550.
- [6] BLAKE, J., R., GIBSON, D., C.:Cavitation bubble near boundaries. Ann. Rev. Fluid Mech., 1987, vol. 19, pp. 99-123.
- [7] BENJAMIN, T., B., ELLIS, A., T.:The Collapse of Cavitation Bubbles and the Pressures thereby Produced against Solid Boundaries. Phil. Trans. R. Soc. Lond., Series A., 1966, vol. 260, no. 1110, pp. 221-240.. 537-550.


Vedoucí diplomové práce:


Ing.. Miloš Muller, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

RNDr. Milan Sedlář, CSc.



  
doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.,  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.  
děkan

V Liberci dne 13. 4. 2011

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

## ANOTACE/ANOTATION

### **Abstrakt:**

Cílem této diplomové práce je popsání kolapsu kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny. Výsledkem práce je závislost síly kolapsu bubliny, na průměru bublinky a na vzdálenosti od pevné stěny. Bublinky byly generovány elektrickým výbojem. Samotný kolaps bublinky byl vyhodnocován pomocí piezoelektrického filmu a hydrofonu. Průběh kolapsu byl zaznamenán pomocí vysokofrekvenční CCD kamery. Teoretická část práce se zabývá stávajícím stavem techniky v oblasti průběhu kolapsu a dynamickým chováním bublinek, experimentálními metodami měření kolapsu bublinek a jevy z kolapsu vyplývající.

### **Klíčová slova:**

kavitace, kolaps bublinky, PVDF film, hydrofon, „jet effect“, „splash effect“, nukleace, Bjerknesova síla

### **Abstract:**

The aim of this thesis is to describe the collapse of cavitation bubbles near a solid boundary. The result is the dependence of the bubble collapse force on the bubble diameter and the distance from the solid boundary. The bubbles were generated by electric discharge. The collapse of the bubbles was evaluated using a piezoelectric film and the hydrophone. The course of the collapse was recorded using high frequency CCD camera. The theoretical part of this thesis deals with the current state of technology in the field of collapse process and dynamic behavior of bubbles, experimental methods for measuring the collapse of bubbles and resulting collapse phenomena.

### **Keywords:**

Cavitation, bubble collapse, PVDF film, hydrophone, jet effect, splash effect, nucleation, Bjerknes force

## **Prohlášení:**

Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užití své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Liberci, 15. 5. 2012

.....  
Marek Pešta  
Nástrojařská 5  
46601 Jablonec nad Nisou

## **Poděkování**

Rád bych tímto způsobem poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Miloš Müllerovi, Ph.D. za odbornou pomoc, věcné připomínky a velké množství podnětů při vypracování zvoleného tématu.

Dále bych chtěl poděkovat kolektivu katedry energetických zařízení za ochotu a podporu po celou dobu studia.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům, kteří mě ve studiu podporovali a podporují.

Marek Pešta

## Obsah

<b>1. ÚVOD [3,5,4,8,7,14]</b> .....	<b>8</b>
1.1 Cíle práce: .....	11
<b>2. Současný stav znalostí:</b> .....	<b>12</b>
2.1 Nukleace [3]: .....	12
2.2 Kavitace a var [3,4,8]: .....	12
2.3 Rayleigh-Plessetova rovnice [1,8]: .....	13
2.4 Kolaps bublinky [3,5]: .....	15
2.5 Nekulový tvar během kolapsu bubliny [3,5]: .....	15
2.6 Bjerknesova síla [12]: .....	16
2.7 „Jet effect” [3,5,12]: .....	17
2.8 „Splash effect” [3,11,12]: .....	19
2.9 Poškození od kolapsu [3,5,13]: .....	20
2.10 Luminiscence [3]: .....	21
2.11 Experimentální metody [1,12]: .....	21
2.11.1 Nepřímé měření: .....	21
2.11.2 Přímé měření: .....	22
2.11.3 Generování bublin: .....	22
<b>3. Experiment</b> .....	<b>24</b>
3.1 Experiment s PVDF filmem: .....	24
3.2 Experiment s PVDF filmem a PVDF hydrofonem: .....	27
3.3 Kalibrace PVDF piezoelektrického filmu: .....	29
3.4 Metodika vyhodnocování: .....	31
3.5 Výpočet síly, impuls síly: .....	33
<b>4. Výsledky</b> .....	<b>34</b>
4.1 Výsledky kalibrace: .....	34
4.2 Experiment s PVDF filmem: .....	34
4.2.1 Závislost síla F- poměr $\gamma$ : .....	39
4.2.2 Závislost impuls síly I- poměr $\gamma$ : .....	41
4.2.3 Čas mezi kolapsy: .....	41
4.3 Experiment s PVDF filmem a hydrofonem: .....	42
4.3.1 Závislost síla F- poměr $\gamma$ : .....	47
4.3.2 Závislost impuls síly- poměr $\gamma$ : .....	49
4.3.3 Čas mezi kolapsy: .....	49
<b>5. Závěr</b> .....	<b>51</b>
<b>6. Seznam použité literatury</b> .....	<b>53</b>
<b>7. Seznam příloh</b> .....	<b>54</b>

## Seznam použitých zkratk a symbolů

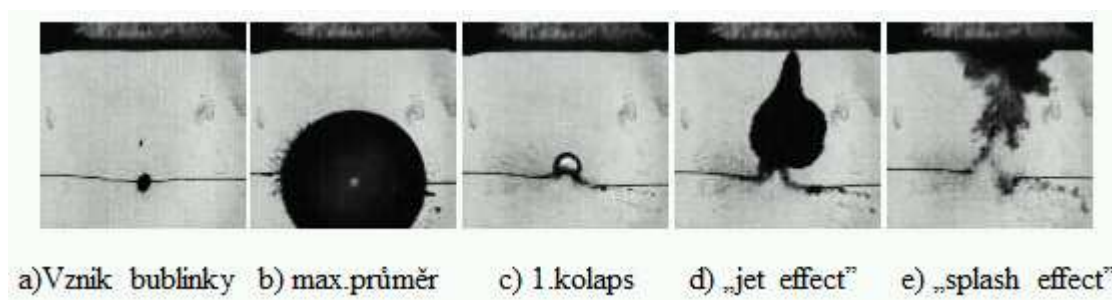
apod.		a podobně
atd.		a tak dále
např.		například
obr.		Obrázek
tzn.		to znamená
$F$	[N]	síla
$R, r$	[m]	poloměr bubliny
$D$	[m]	průměr bubliny
$S$	[N/m]	povrchové napětí
$\mu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematická viskozita
$t$	[s]	čas
$T$	[K]	teplota
$\rho$	[m <sup>3</sup> /kg]	hustota
$p$	[Pa]	tlak
$p_{\infty}$	[Pa]	tlak daleko od bublinky
$T_{\infty}$	[K]	teplota daleko od bublinky
$p_B$	[Pa]	tlak v bublince
$T_B$	[K]	teplota v bublince
$u$	[m/s]	rychlost
$\gamma$	[-]	poměr $h_0 / R_{max}$
$R_{max}$	[m]	maximální poloměr bublinky
$h_0$	[m]	vzdálenost bublinky od jejího středu ke stěně
$m$	[kg]	hmotnost
$v_1$	[m/s]	počáteční rychlost
$v_2$	[m/s]	konečná rychlost
$\tau$	[s]	doba působení
$h_1$	[m]	počáteční výška
$h_2$	[m]	konečná výška
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	gravitační zrychlení
$U$	[V]	elektrické napětí
$I$	[N.s]	impuls síly



## 1. ÚVOD [3,5,4,8,7,14]

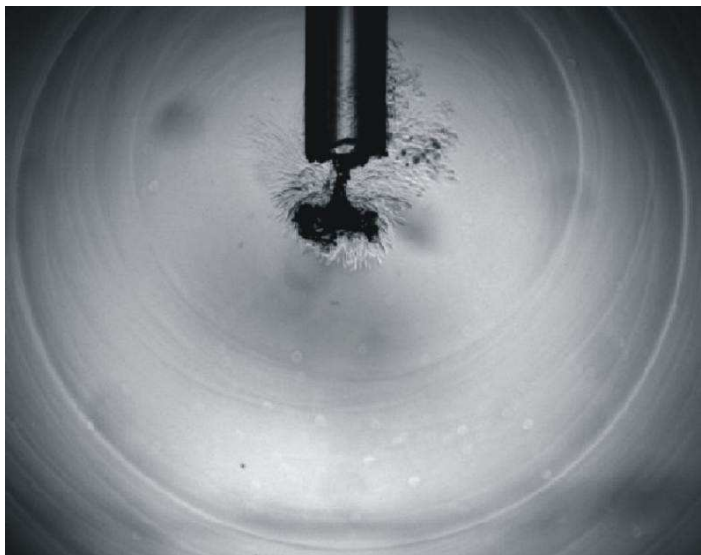
Pod pojmem kavitace rozumíme jev, který je spojen se vznikem, zánikem a aktivitami mikroskopických dutin v kapalině. S kavitací se můžeme setkat v mnoha oborech lidské činnosti. Nejčastěji se s kavitací setkáváme v aplikacích blízkých hydrodynamice, jako jsou nejrůznější hydraulické systémy, nebo konstrukce čerpadel a turbín. Kavítaci lze sledovat i ve volné přírodě, v lidském těle, rostlinách a v jiných organismech. Probíhá ve všech médiích, u kterých je možná fázová přeměna z tekutého skupenství na páru. Ke kavitaci dochází v okamžiku, kdy tlak v některém místě kapaliny poklesne pod určitou úroveň. Tato úroveň je dána zejména tlakem nasycených par, obsahem plynů a pevných částic v kapalině a dalšími vlivy. Průběh kavitace zahrnuje několik fází. Tyto fáze představují vznik bublinky (viz obr. 1.1a), její růst (viz obr. 1.1b) a kolaps (viz obr. 1.1c). Nejprve se v kapalině začnou tvořit zárodky nové termodynamické fáze. Tomuto procesu říkáme nukleace. Nukleací vzniknou jádra pro budoucí bublinku. Po nukleaci může bublina narůst až do určité velikosti, jejíž hodnota je dána takzvaným kritickým poloměrem. Následně může takto vzniklá bublinka začít růst a oscilovat. Během těchto oscilací může dojít i k implozi bublinky. Implozí nazýváme proces, při kterém bublina, která je obklopena vodou, během krátkého časového intervalu prudce zmenší svůj poloměr. Po implozi může bublinka opět začít růst nebo se rozpadne – zhroutlí se. Během imploze bublinky se dočasně mohou lokálně zvýšit tlak i teplota na velmi vysoké hodnoty.

Kolaps bubliny může být doprovázen i dalšími jevy. Jedná se například o generaci proudu tekutiny směrem ke stěně (viz obr. 1.1d), takzvaný „jet effect“. Dalším doprovodným jevem je „splash effect“ (viz obr. 1.1e), což je radiální proudění na osu jetu při kolapsu bublinky na stěně. Kolaps bublinky je také zdrojem intenzivních rázových vln (viz obr. 1.2).



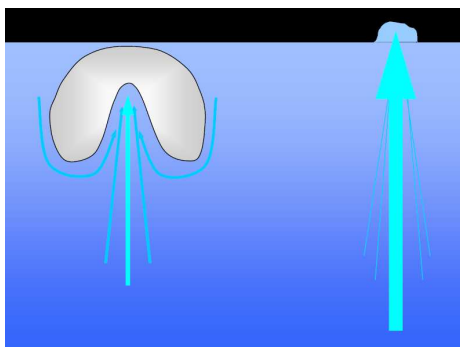
*Obr. 1.1: Znárodnění průběhu kavitačního procesu.*

V mnoha aplikacích se jedná o nežádoucí fyzikální jev, který působí velmi nepříznivě. Důsledky kavitace jsou mechanické opotřebení a degradace mechanických materiálů.



*Obr. 1.2: Vznik rázových vln při kolapsu bublinky [8]*

V praxi se kavitace běžně vyskytuje např. u lopatek turbín, oběžných kol čerpadel, u lodního šroubu atd. Proud tekutiny generovaný bublinkou během kolapsu za spolupůsobení rázových vln zasahuje povrchy součástí vystavených kavitaci vysokou rychlostí. Tím dochází ke koncentraci tlaků lokalizovaných v poměrně malé oblasti a k odlupování materiálu povrchu (viz obr. 1.3). Tento proces pak označujeme jako kavitační eroze. Proces eroze je ve většině aplikací nežádoucí a způsobuje velké škody. Častým příkladem této eroze je poškození oběžného kola čerpadla (viz obr. 1.4). Dalšími negativními následky kavitace je snížení účinnosti strojů, vznikající vibrace a hluk.



*Obr. 1.3: Schématické znázornění imploze kavitační bublinky s erozí materiálu [6]*



*Obr. 1.4: poškození oběžného kola kavitační erozí [13]*

Kavitace je obecně považována za jev negativní, naproti tomu však existuje celá řada aplikací, kde lze kavitačního jevu využít. Asi největší uplatnění nachází kavitace v současné době v medicíně. Využívá se především v zubním lékařství, při léčbě ledvinových a žlučových kamenů, v oční chirurgii pro léčbu šedého zákalu a velmi rozšířená je také kavitační liposukce. Důležitou aplikací je pak čištění vody a čištění povrchů.

Samostatnou kapitolou je superkavitace. Je to proces, při kterém je objekt pohybující se v kapalině obklopen kavitační bublinou a umožňuje mu tak dosahovat velkých rychlostí. Vysokých rychlostí se dosáhne především proto, že není nutné překonávat vysoké tření. Tohoto jevu se využilo pro konstrukci superkavitačních torpéd.

Všechny nepříznivé účinky kavitace i její využívání jsou spojeny s kolapsem kavitační bublinky a její interakce s povrchy těles. Aby bylo možno odhadnout účinky kavitace, je třeba změřit sílu, jakou působí bublinka na stěnu a případně v jaké vzdálenosti od stěny představuje samotná bublinka pro povrch stěny potenciální nebezpečí. Ačkoliv je zřejmé, že reálný proces kavitace je výsledkem působení velkého množství bublin, je pochopení chování samostatných bublin klíčem k porozumění procesu kavitace.

## **1.1 Cíle práce:**

Aby bylo možno odhadnout velikost účinků kolapsu kavitační bublinky na pevnou stěnu byly navrženy následující kroky řešení:

1. Provést podrobnou rešerši mechanismů interakce kavitační bublinky s pevnou stěnou.
2. Provést návrh experimentu pro vizualizaci kolapsu bublinky v blízkosti pevné stěny.
3. Navrhnout možnou techniku měření účinku kolapsu kavitační bublinky na pevnou stěnu.
4. Provést experimentální měření kolapsů kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro několik různých maximálních poloměrů bublinky a několik různých vzdáleností od stěny.
5. Navrhnout metodiku pro vyhodnocení účinků kolapsu bublinky v blízkosti stěny.
6. Provést vyhodnocení vlivu počátečního poloměru bublinky a její vzdálenosti od stěny na sílu bublinky směrem ke stěně.
7. Vyhodnotit způsoby interakce bublinky a pevné stěny pro různé vzdálenosti bublinky od stěny.

## **2. Současný stav znalostí:**

### ***2.1 Nukleace [3]:***

Nukleace je proces tvorby samostatné termodynamické fáze. V našem případě se jedná o vznik bublinek v kapalně fázi. Obecně se dá nukleace rozdělit na dvě skupiny a to na heterogenní nukleaci a homogenní nukleaci.

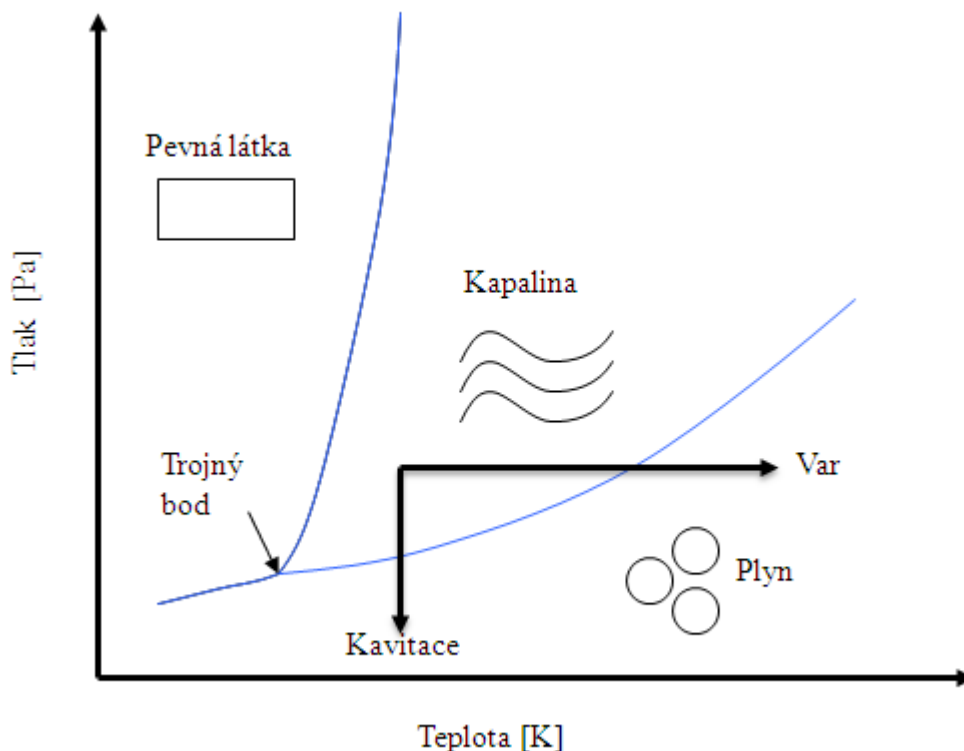
Homogenní nukleace je způsobena tepelnými pohyby molekul v tekutině, které mají za následek tvorbu dočasných mikroskopických pórů, které pak mohou představovat jádra potřebné k růstu makroskopické bubliny. Tvorba jádra znamená vytvoření rozhraní na rozhraní nové fáze.

Naproti tomu heterogenní nukleace vzniká na rozhraní mezi kapalinou a stěnami nádoby, popřípadě mezi kapalinou a částicemi v ní rozptýlenými. Tato nukleace se vyskytuje častěji nežli homogenní nukleace.

### ***2.2 Kavitace a var [3,4,8]:***

Kavitací rozumíme proces růstu makroskopických bublin v kapalině při poklesu tlaku za přibližně konstantní teploty. Proces růstu bublinky nastane, pokud je kapalina podrobena snížení tlaku pod hodnotu nižší než je hodnota tlaku nasycených par. Naproti tomu proces vzniku kavit při vzrůstající teplotě a přibližně konstantního tlaku nazýváme varem (viz obr. 2.1).

Z termodynamického hlediska jde o totožné děje, avšak důsledky těchto jevů jsou jiné. Rozdíl je v tom, že bubliny vytvořené při vysokých teplotách obsahují relativně mnoho tepla a bubliny tak kolabují pomalu. Pokud ale překročíme hranici mezi kapalinou a plynem v blízkosti trojného bodu, obsahují bublinky páru, která má malý tepelný obsah. Jejich kolaps pak může být velmi rychlý a agresivní. Záleží tedy na tom, kde překročíme hranici mezi kapalinou a plynem, nikoliv na tom, jakým způsobem křivku překročíme.



Obr. 2.1: Schématické zobrazení průběhu kavitace a varu ve fázovém diagramu [4]

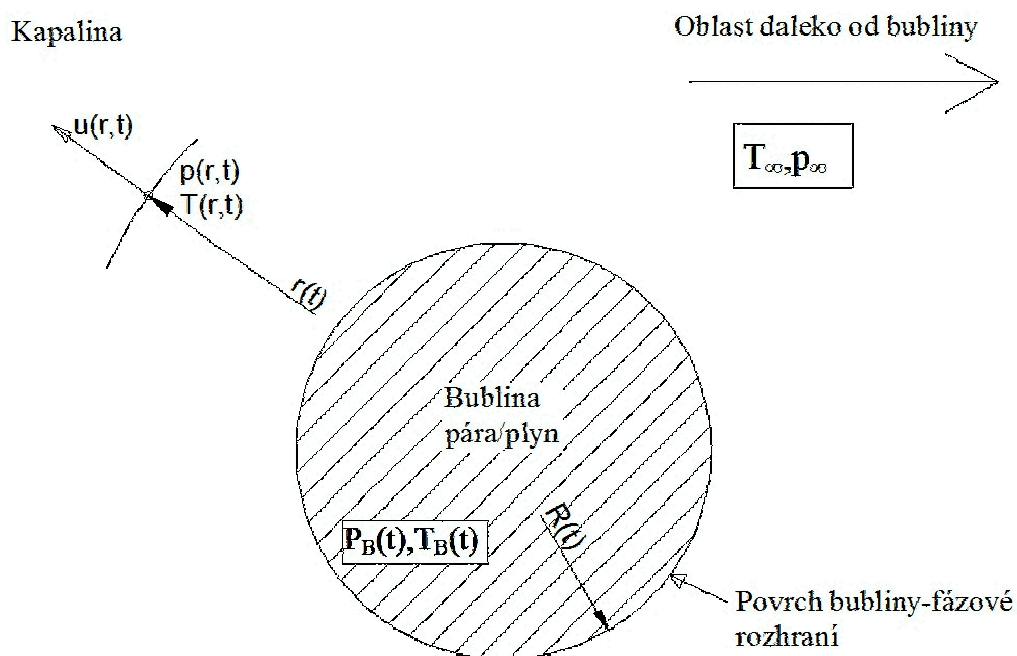
### 2.3 Rayleigh-Plessetova rovnice [1,8]:

Růst a kolaps bublinky naplněné parou nebo plynem, je možno matematicky popsat pomocí Rayleigh-Plessetovy rovnice:

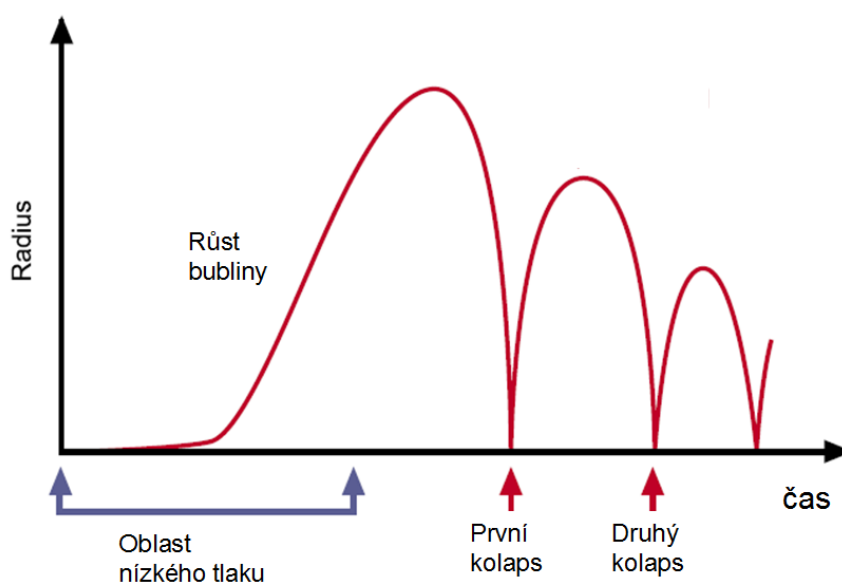
$$\frac{p_B(t) - p_\infty(t)}{\rho} = R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\mu}{R} \cdot \frac{dR}{dt} + \frac{2S}{\rho R} \quad [1]$$

Tato rovnice popisuje chování bubliny o poloměru  $R$  uvnitř nekonečné oblasti tekutiny (viz obr. 2.2). Tekutina má povrchové napětí  $S$ , kinematickou viskozitu  $\mu$ , teplotu  $T_\infty$  a tlak  $p_\infty$  v oblasti daleko od bubliny. Hodnoty fyzikálních vlastností tekutiny jako je kinematická viskozita, stlačitelnost a povrchové napětí považujeme za konstantní tj. nezávislé na teplotě a tlaku. Řešením Rayleigh-Plessetovy rovnice [1] dostaneme typický průběh následných expanzí a kolapsů pro kulovou bublinu (viz obr. 2.3). Oscilace bublinky jsou dány přítomností vzduchu, který funguje jako pružina, a kinetickou energií kapaliny. Vzduch v bublince tak může být stlačen jen do určité míry a pak dojde znovu k růstu bubliny. Bublinka obsahuje také vodní páru, která však

během prudkého stlačení zkondenzuje. Při dalších kolapsech se bublina může rozbít na oblak menších bublinek. Tento mrak má pak jiné dynamické chování než samostatná bublina.



Obr. 2.2: Schématické zobrazení bublinky v nekonečné kapalině



Obr. 2.3: Typický průběh závislosti poloměru bubliny na čase podle Rayleigh-Plessetovy rovnice [4]

## ***2.4 Kolaps bublinky [3,5]:***

Proces kolapsu bublinky má nelineární charakter. Kolaps bubliny je důležitý z hlediska poškození materiálu. Příčinou tohoto poškození jsou vysoké tlaky a teploty doprovázející kolaps bublinky. Kolaps bublinky je výrazně ovlivňován množstvím plynů a par uvnitř bublinky a stlačitelností tekutiny. Plyn uvnitř bublinky zpomaluje průběh kolapsu a stlačitelnost tekutiny ovlivňuje tvorbu rázových vln. Tyto rázové vlny nejsou produktem prvního kolapsu, ale důsledkem vratné fáze před druhým kolapsem. V průběhu kolapsu jsou tepelné účinky většinou zanedbatelné, avšak jsou důležité v okamžiku samotného zhroucení bubliny. Teplota v konečné fázi kolapsu uprostřed bubliny může dosahovat hodnot až 9000 K a tlak okolo 840 barů. Konečná fáze kolapsu však probíhá rychle a tyto hodnoty se pohybují jen v malých časových úsecích. Při kolapsu bublinky kromě stlačitelnosti tekutiny hraje také důležitou roli vzájemná difúze par a plynů v bublině. Na rozhraní kapaliny a obsahu bublinky se může nahromadit nezkondenzovatelný plyn. Přes tento plyn pak pára musí difundovat, aby došlo k její kondenzaci, a proces kolapsu se tím zmírňuje.

## ***2.5 Nekulový tvar během kolapsu bubliny [3,5]:***

Kolaps bublinky je doprovázen deformacemi jejího původně kulového povrchu, které jsou častěji v souvislosti s jejich matematickým popisem označovány jako nestability. Jestliže uvažujeme kolaps bubliny převážně vyplněné parou, pak můžeme rozlišit dvě důležité etapy kolapsu.

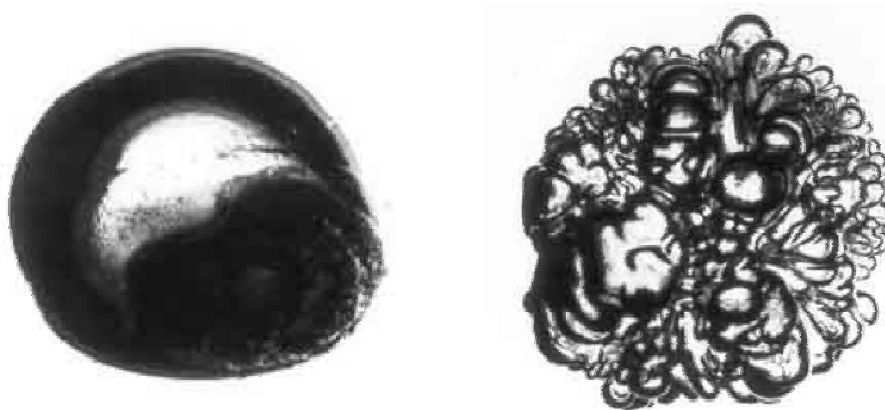
První etapou je asymptotická forma kolapsu. Tato etapa nastává před významným stlačením plynového obsahu bublinky. Zrychlení povrchu bublinky je záporné a dochází jen k mírným nestabilitám (viz obr. 2.4 vlevo). Tyto nestability mají pravděpodobně malý nebo žádný praktický důsledek.

Druhou etapou je vratná fáze. Při vratné fázi zrychlení mění smysl a nabývá velkých kladných hodnot. Díky těmto vysokým hodnotám zrychlení se pak bublina může stát velmi nestabilní. Nestabilita bubliny se projevuje různými způsoby, které závisí na průběhu kolapsu a na přítomnosti dalších rozhraní. Kolaps bubliny může probíhat tak, že se bublina rozdělí do menších bublinek (viz obr. 2.4 vpravo), které mají řádově menší velikost než je maximální velikost bubliny těsně před kolapsem. Tento



rozpad je většinou způsoben „jet efektem“, nebo sférickými harmonickými poruchami vyšších řádů.

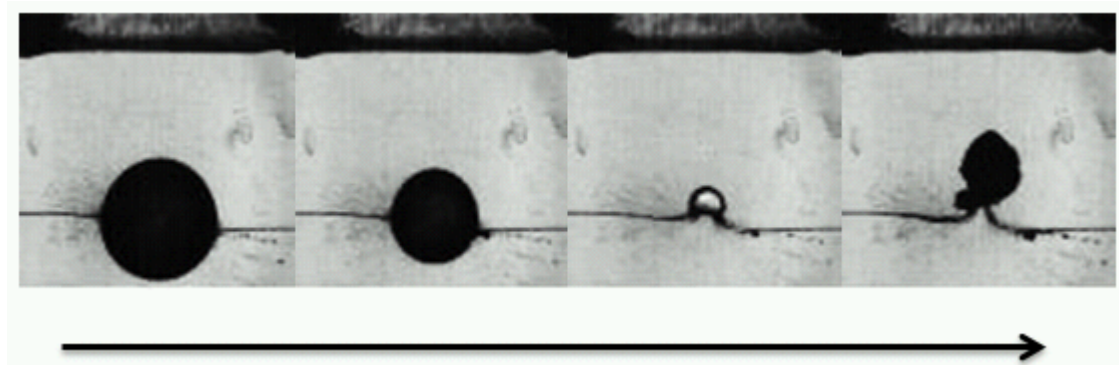
Naproti tomu chování při kolapsu bublin vyplněných převážně plynem je sféricky stabilnější, než tomu je u bublinek vyplněných parou. Je tomu tak z důvodu menšího zrychlení právě v důsledku přítomnosti plynu uvnitř bublinky. Například akusticky tvořené bubliny, které tvoří převážně plyn, zůstávají po vratné fázi většinou kulové.



*Obr. 2.4: nalevo bublina těsně před kolapsem, napravo bublina těsně po kolapsu a vratné fázi [3]*

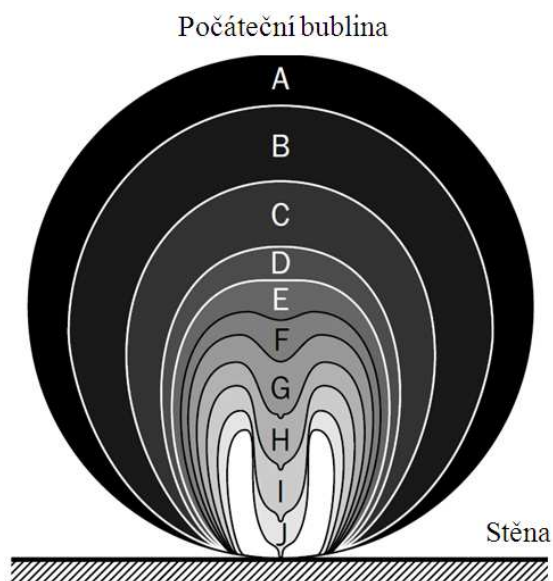
## **2.6 Bjerknesova síla [12]:**

Jestliže bublina kolabuje v blízkosti pevné stěny, dolní část bubliny začne kolabovat rychleji než horní část. Tato asymetrie způsobuje rozdíl tlaků nad a pod bublinkou a je příčinou toho, že kolaps nenastává přímo v místě vzniku bublinky, nýbrž blíže ke stěně. Hnacím mechanismem tohoto jevu, který je patrný na obrázku 2.5, je takzvaná Bjerknesova síla.



*Obr. 2.5: situace při kolapsu bubliny*

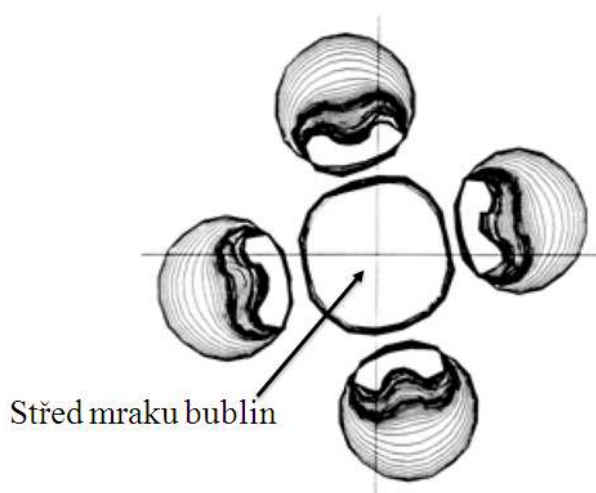
## 2.7 „Jet effect” [3,5,12]:



Obr. 2.6: formování „Jet efektu” v blízkosti stěny [5]

Při kolapsu parních bublin je značně dominantní vliv asymetrií. Těmito asymetriemi může být přítomnost pevné stěny v okolí, nebo existence gravitace. Tyto asymetrie způsobují rychlejší deformaci bublinky na jedné straně nežli na straně opačné. Asymetrie způsobují vysokorychlostní proud tekutiny, jež směřuje dovnitř bubliny. Nakonec tento proud tekutiny („jet effect”) bublinu rozdělí a zasáhne pevnou stěnu (viz obr. 2.6).

Další asymetrií, která způsobuje vznik „jet efektu” je silové působení mezi bublinami (viz obr. 2.7). V mračnu bublin mají bubliny na okrajích sklon k „jet efektu” směrem doprostřed mraku.



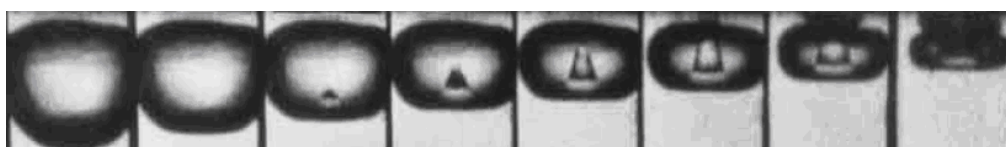
Obr. 2.7: formování „jet efektu” v mraku bublin [3]

Důležitým parametrem používaným při popisu kolapsu bublinky v blízkosti pevné stěny je poměr  $\gamma$ , který je definován následovně:

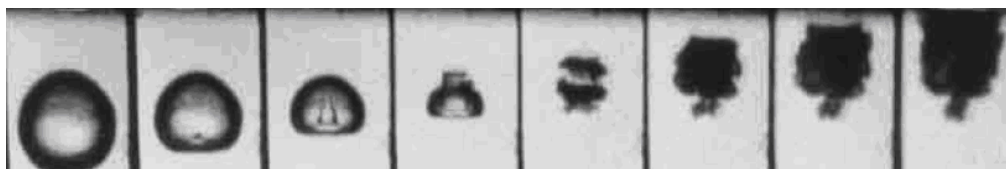
$$\gamma = \frac{h_0}{R_{\max}} \quad [2]$$

kde  $h_0$  je počáteční vzdálenost bublinky od pevné stěny a  $R_{\max}$  je maximální poloměr bublinky.

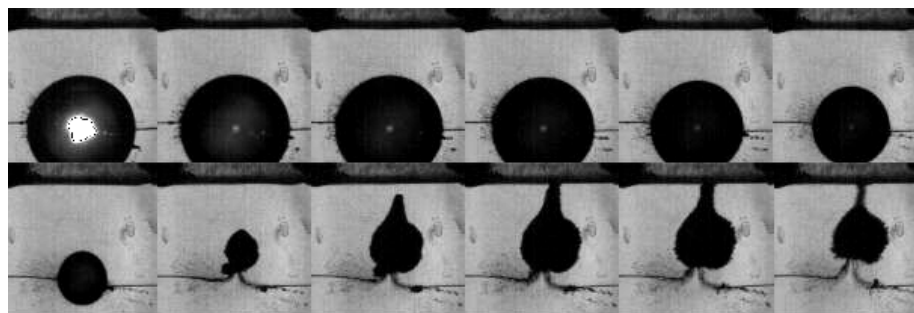
Charakter kolapsu výrazně závisí na vzdálenosti středu bublinky od pevné stěny. Jestliže bublina kolabuje velmi blízko stěny, pak má „jet effect“ zcela jiný průběh než když bublina kolabuje dále od stěny (viz obr. 2.8 a 2.9).



*Obr. 2.8: kolaps bublinky v blízkosti stěny [3]*



*Obr. 2.9: kolaps bublinky dále od stěny [3]*



*Obr. 2.10: kolaps bublinky ve vzdálenosti přibližně průměru od stěny*

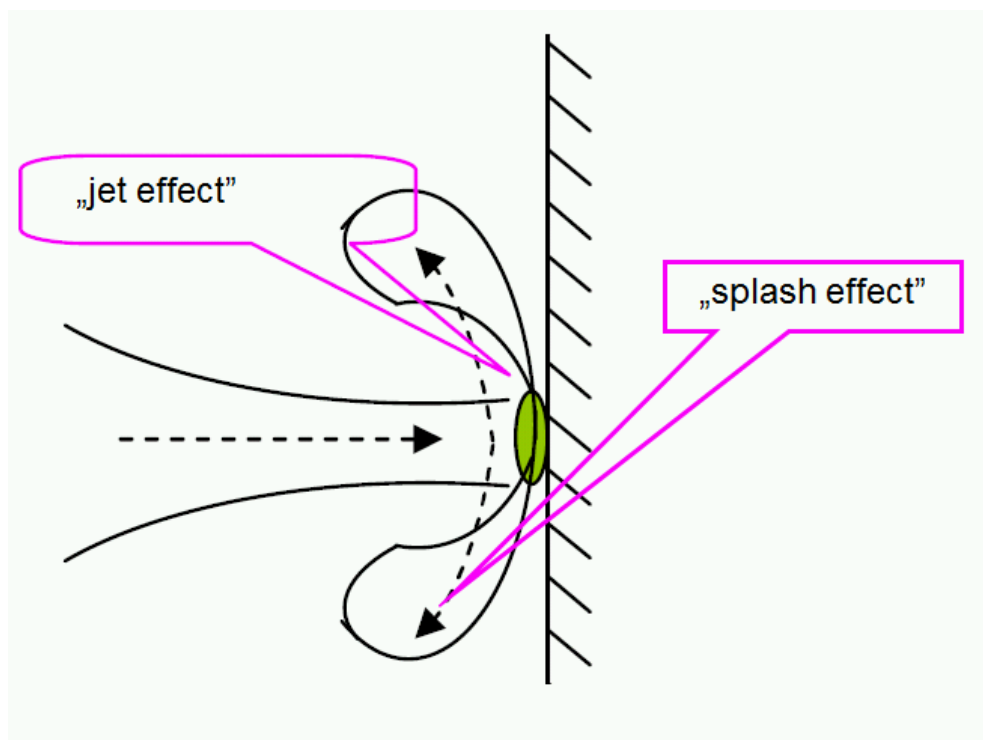
Jestliže je bublina ve vzdálenosti přibližně jednoho průměru od stěny, tzn.  $\gamma=2$ , probíhá kolaps s „jet efektem“ přibližně sféricky (viz obr. 2.10). Na druhou stranu, jestliže je bublina blízko stěny, je povrch bublinky výrazně deformovaný. Proto je v těchto případech obtížné sledovat chování „jet efektu“. Pokud bublina kolabuje blízko stěny v klidném prostředí, tak „jet effect“ dosahuje velkých rychlostí již v raném stadiu

kolapsu. Experimenty také ukazují, že po kolapsu vzniká mrak bublin. Tento jev je však těžko popsitelný, protože probíhá ve velice krátkém časovém úseku.

## 2.8 „Splash effect” [3,11,12]:

„Splash effect” je v podstatě radiální proudění na osu „jet efektu”, které je způsobeno přítomností stěny. Vzniká, jakmile je bublina ve vzdálenosti přibližně jednoho poloměru od stěny ( $\gamma_0=0,6-1$ ) a to v okamžiku těsně po nárazu „jet efektu” na stěnu. Vznik „splash efektu” závisí zejména na tloušťce vrstvy kapaliny mezi bublinou a stěnou.

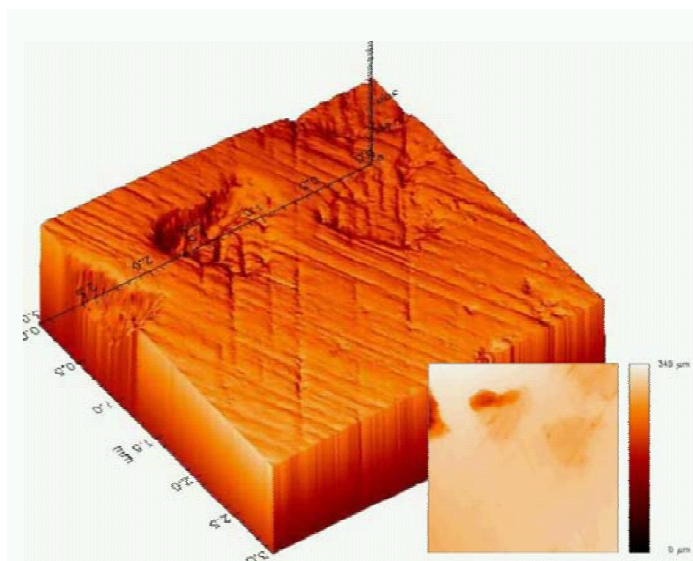
„Jet effect” působící na stěnu způsobuje to, že se vytváří proud podél stěny. Kolizí tohoto proudu s tekutinou proudící dovnitř smršťující se bublinky vznikne „splash effect”. Působením „jet efektu” a vznikem „splash efektu” se bublina v blízkosti stěny transformuje do houbovitého tvaru (viz. Obr 2.11). Účinky „splash efektu” jsou stejné, nebo i vyšší jako u „jet efektu” [12].



Obr. 2.11: Schematické znázornění „splash efektu” [11]

## 2.9 Poškození od kolapsu [3,5,13]:

Jestliže kolaps probíhá v blízkosti pevného povrchu, tak v jeho důsledku dojde lokálně ke zvýšení napětí na povrchu. Opakování tohoto procesu způsobuje únavové porušení povrchu materiálu a následné oddělení. Toto porušení má vždy zubatý až krystalinický tvar na rozdíl od porušení mechanickými částicemi, které je velmi jemné. Kolaps a spolupůsobící „Jet effect“ se obzvláště projevují u měkkého materiálu, kde jsou viditelné jednotlivé jamky od každého kolapsu (viz. Obr 2.12).

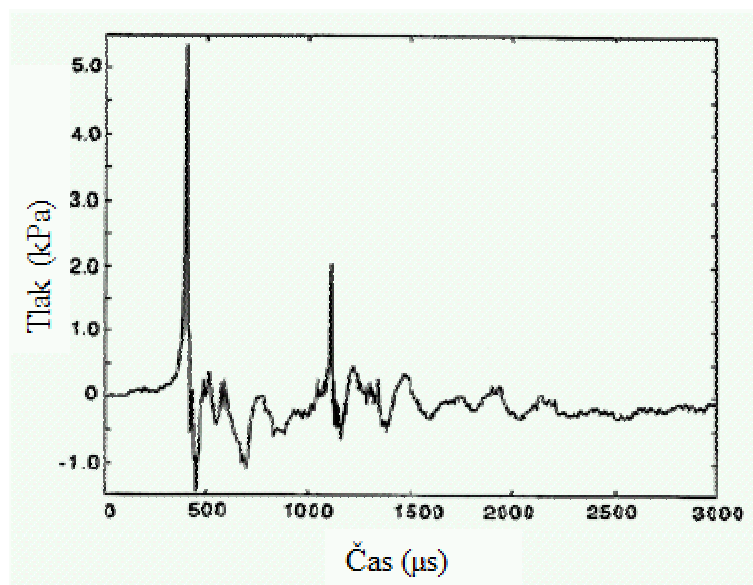


Obr. 2.12: ukázka mikroeroze na lopatce čerpadla [13]

V současné době se předpokládá, že odebrání materiálu je způsobeno jak „Jet efektem“, tak rázovými vlnami od kolapsu[3,10]. Ve většině případů je odebrání materiálu nežádoucím jevem, avšak najdou se i odvětví kde je tohoto fenoménu využíváno, jako je například řezání vodním paprskem, nebo v oblasti zubního lékařství.

Dalším negativním jevem provázejícím kolaps je vznikající hluk. Tento hluk je důsledkem velkých tlaků při kolapsu. Často jsou projevy a přítomnost kavitace detekovány spíše hlukem ve formě praskání, než samotným pozorováním mechanického opotřebení způsobeného bublinami.

Z hlediska poškození je nejvíce nebezpečný první a druhý kolaps bublinky. Další následující kolapsy již nemají takový energetický potenciál jako první dva kolapsy. Toto tvrzení lze demonstrovat na typickém akustickém signálu kolapsu samostatné bublinky (viz obr. 2.13). Zde lze spatřit na 450 μs první kolaps a na zhruba 1100 μs druhý kolaps.



Obr. 2.13: Typický akustický signál [3]

## 2.10 Luminiscence [3]:

Protože při kolapsu bubliny nastávají extrémní podmínky jako je vysoká teplota a tlak, může nastat v nekondenzovaném plynu jev zvaný luminiscence. Jedná se o emisi světla při kolapsu bubliny, která se projevuje intenzivními záblesky.

## 2.11 Experimentální metody [1,12]:

Z dřívějších experimentů vyplývá, že kvůli vysokým amplitudám a krátkým časovým intervalům při kolapsu bublin jsou na snímače tlaku kladeny vysoké požadavky. K měření kolapsu bublin se používají dvě metody. První metodou je přímé měření a druhou metodou nepřímé měření.

### 2.11.1 Nepřímé měření:

K nepřímému měření se používá především hydrofon. Je to zařízení, které nám umožňuje detekovat zvuky ve vodním prostředí. Akustický signál od kolabující bubliny je přijat hydrofonem, který je umístěn v určité vzdálenosti od středu bubliny. Hydrofon je většinou kalibrovaný a tak je následně možný přepočet napěťového signálu na tlak.

Tento postup však vyhovuje zejména v případě, jestliže se jedná o bublinu kulového tvaru. Jakmile bublina ztrácí kulový tvar jako tomu je například při kolapsu bubliny u stěny, je nutné použít přímého měření. Důvodem je, že při kolapsu kulové bubliny je hlavní část energie předána akustickému signálu, zatímco při kolapsu bubliny u stěny již tomu tak není.

### 2.11.2 Přímé měření:

U přímého měření je čidlo umístěno přímo na pevné stěně v místě, kde dochází ke kolapsu. Používá se hlavně piezoelektrický film PVDF-Polyvinylidenfluorid (viz obr. 2.14). Podstatou měření je piezoelektrický jev, což je vlastnost krystalů při mechanickém namáhání generovat orientované dipóly, čímž vzniká elektrické napětí [7].



*Obr. 2.14: PVDF film*

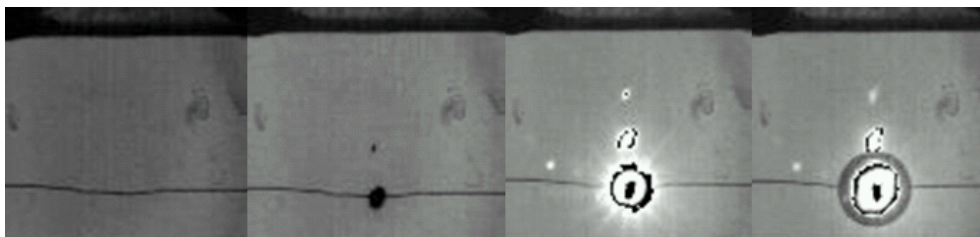
### 2.11.3 Generování bublin:

Generovat bubliny v laboratorním prostředí je možno několika základními způsoby. Prvním z nich je pomocí techniky kinetického impulsu [1]. V tomto případě je kapalina namáhána tahem až do přetržení vodního sloupce. Tento způsob asi nejlépe odpovídá skutečné kavitaci, avšak v laboratorních podmínkách je obtížně dosažitelný.

Další způsob generování bublin je pomocí elektrického výboje, jenž je použit i v této práci jako experiment (viz obr. 2.15). Tento způsob umožňuje kvalitní pozorování

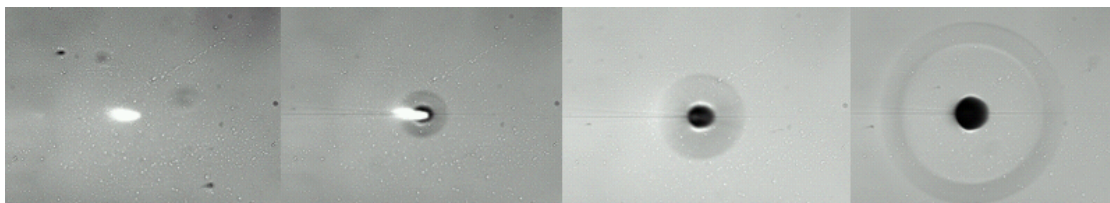


dynamiky bublin s relativně nízkými náklady. Malou nevýhodou ovšem je, že přítomnost elektrod ovlivňuje chování bubliny při kolapsu.



*Obr. 2.15: generování bublinky pomocí elektrického výboje*

Další možnost generování bublin je pomocí laseru (viz obr. 2.16). Toto řešení je sice nákladnější, avšak odpadá problém s elektrodami. Nevýhodou může být teplotní šok při generování bubliny s následným odpařováním tekutiny, to však platí i v případě elektrického výboje.



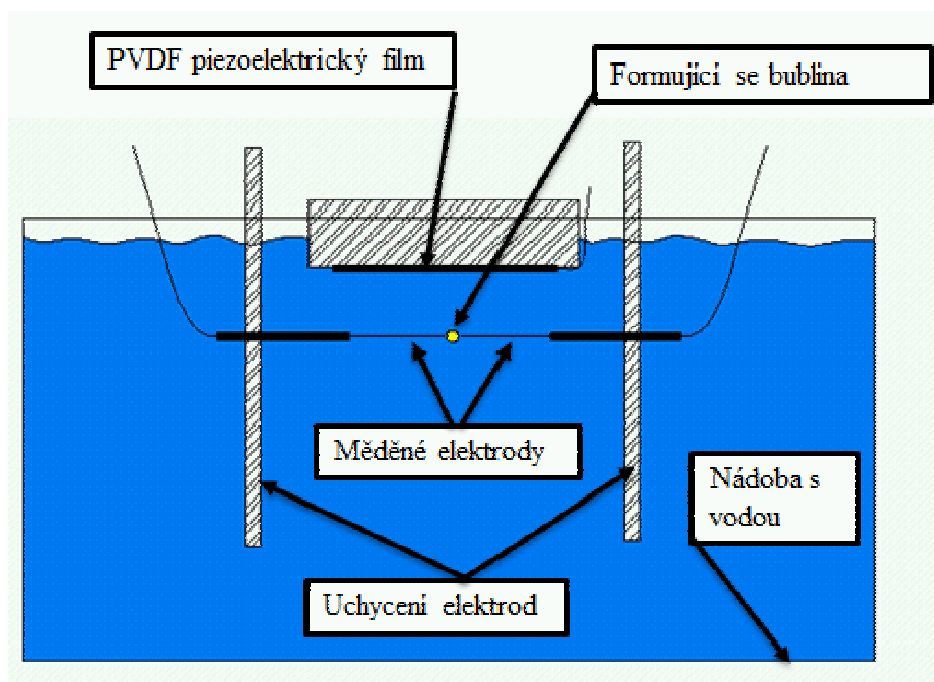
*Obr. 2.16: generování bublinky pomocí laseru*



### 3. Experiment

#### 3.1 Experiment s PVDF filmem:

Obsahem této kapitoly je popis návrhu experimentu použitého pro měření účinku kolapsu jiskrou generované bublinky v blízkosti pevné stěny. Bublinky byly generovány výbojem získaným vybitím kondenzátoru napojeného na dvě měděné elektrody. Obě elektrody byly v přímém kontaktu, aby bylo možné docílit výboje při nízkém napětí. Pro určení průběhu tlakového působení bublinky na stěnu byl použit PVDF piezoelektrický film, který byl nalepen pomocí polypropylenové lepicí pásky na destičku plexiskla a společně s ním ponořen do vody (viz obr. 3.1). Polypropylenové lepicí pásky bylo použito pro lepší ochranu PVDF filmu proti tepelnému namáhání od vznikajících výbojů.



Obr. 3.1: detail uspořádání v nádobce

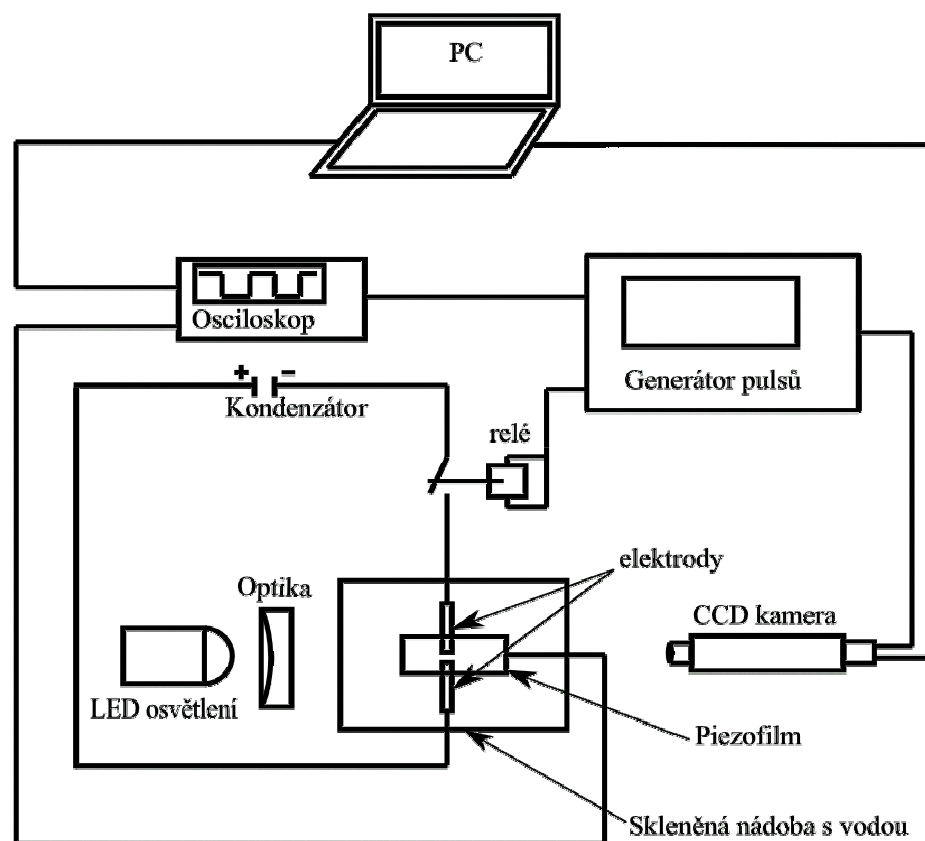
Experiment byl proveden pro tři různá napětí a také pro tři různé vzdálenosti od stěny. Pro určení závislosti síly na stěnu na parametru  $\gamma$  bylo potřeba zaznamenat průběh kolapsu také pomocí vysokorychlostní CCD kamery (viz obr. 3.2). Kamerou byl snímán experiment s rozlišením 10 000 snímků za vteřinu. Pro dokonalé nasvícení

experimentu bylo použito výkonného LED svítidla. Pro digitalizaci signálu byl použit osciloskop se vzorkovací frekvencí 60 MHz. Pomocí generátoru pulzů byl pak celý systém synchronizován. Schéma a uspořádání experimentu je na obr. 3.3 resp. 3.4.

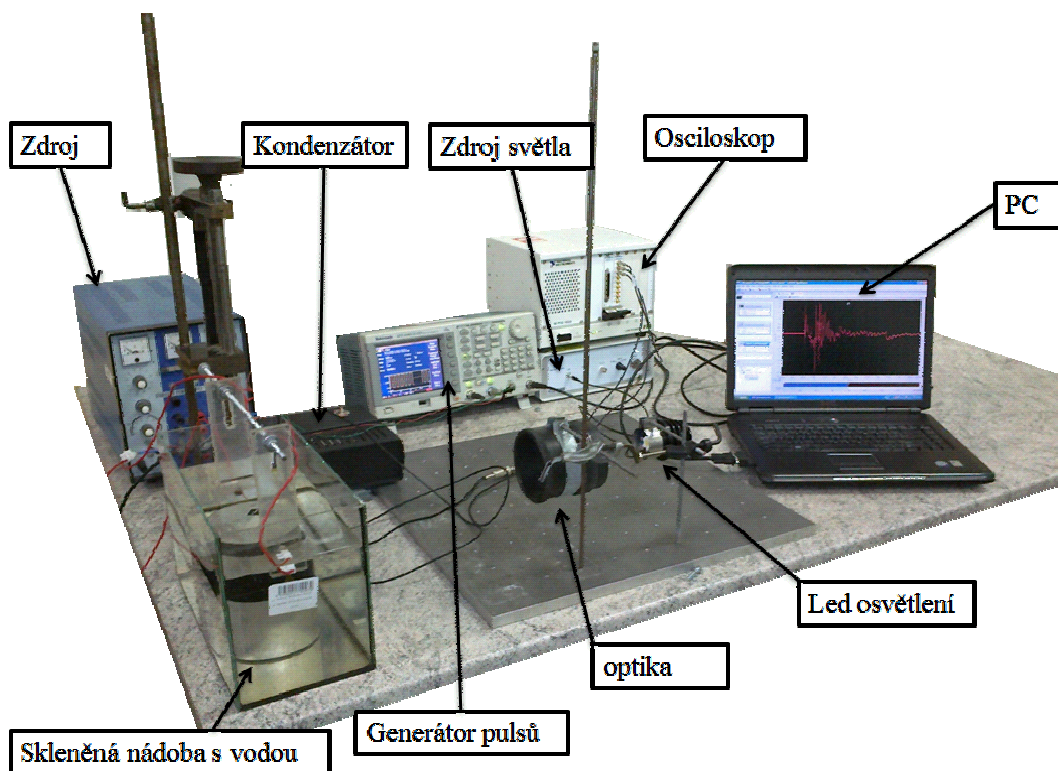


*Obr. 3.2: použitá vysokofrekvenční kamera*

Postup měření byl následující. Nejprve byly měděné elektrody nastaveny do výchozího stavu, tj. do společného kontaktu a zároveň byla nastavena vzdálenost elektrod od stěny. Toto nastavení vzdálenosti bylo provedeno pomocí přednastavení vodícího sloupku, na kterém byly elektrody umístěny. Před každým měřením byl kondenzátor nabit na známou hodnotu napětí pomocí externího zdroje. Tímto postupem byla regulována optimální velikost generované bublinky. Celý systém byl inicializován pomocí ruční externí spouště na generátoru pulzů. Signály z dalších kanálů generátoru signálu byly dále použity pro spuštění CCD kamery, spuštění snímání osciloskopu a sepnutí relé v obvodu s kondenzátorem a elektrodami. Sepnutím relé došlo k propojení obvodu do zkratu a výboji a také ke vzniku zkoumané bubliny. Průběh kolapsu bubliny byl následně zaznamenán pomocí PVDF filmu a digitalizován pomocí osciloskopu. Následně byl signál zobrazen v softwarovém prostředí LabView-signalexpess.



Obr. 3.3: schéma experimentu



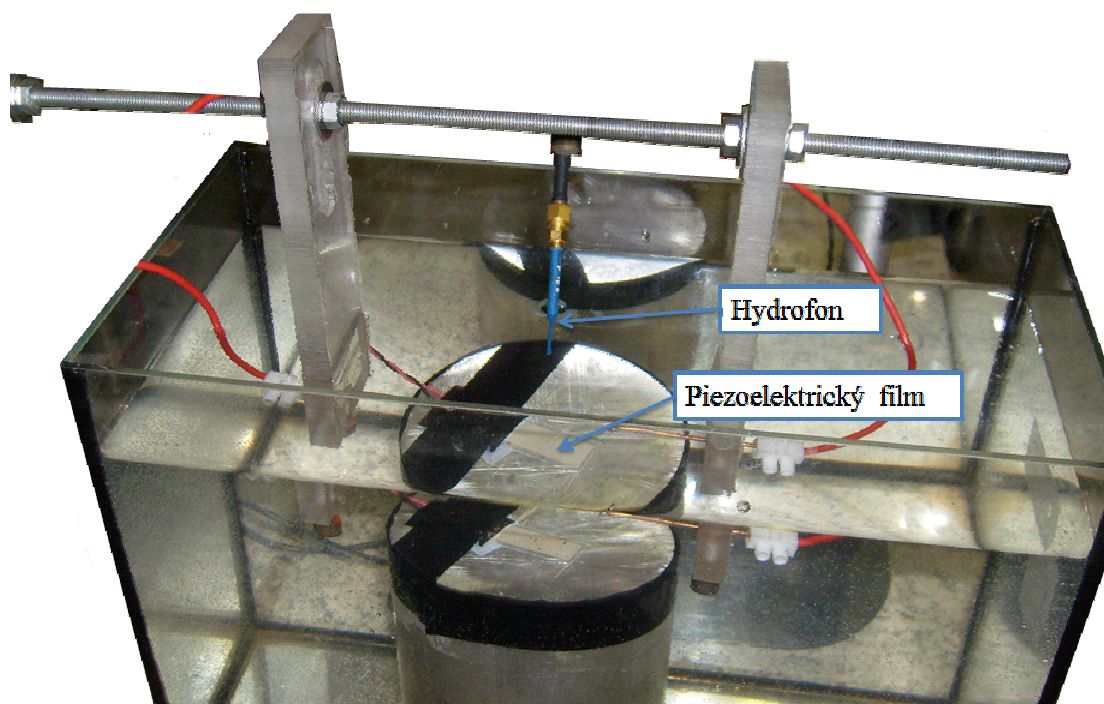
Obr. 3.4: uspořádání experimentu

### 3.2 Experiment s PVDF filmem a PVDF hydrofonem:

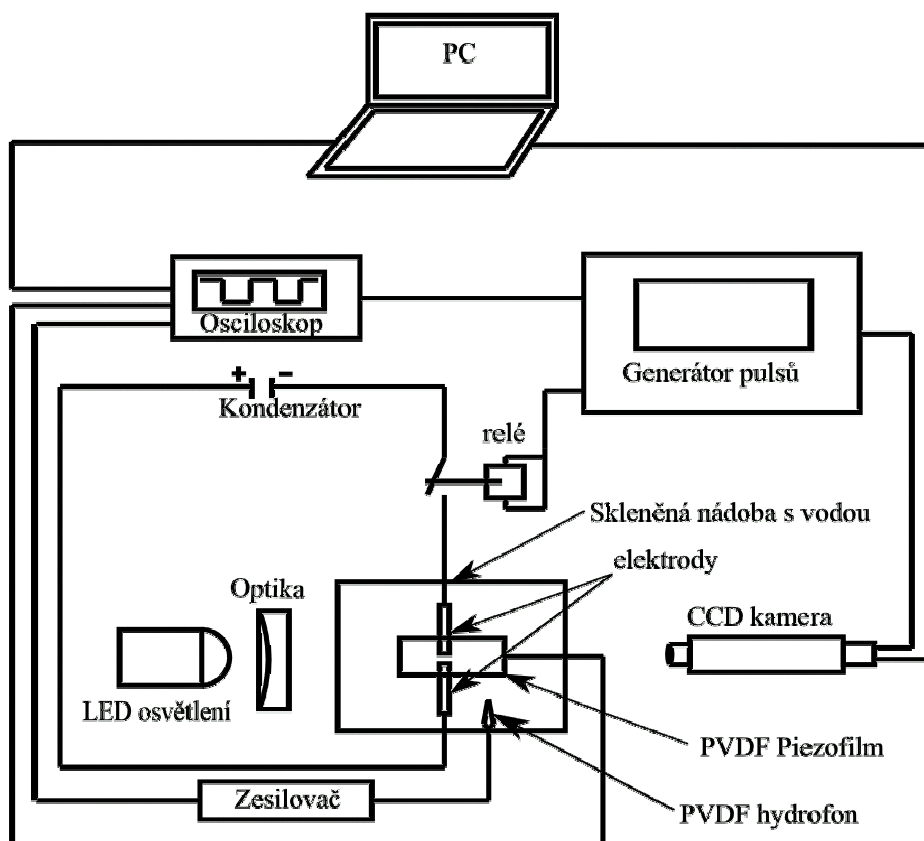
Pro určení průběhu tlakového působení bublinky na stěnu byl v tomto případě použit PVDF piezoelektrický film a současně PVDF hydrofon (viz obr. 3.5). Ideově se jednalo o stejnou sestavu experimentu, jaká byla popsána v kapitole 3.1. PVDF hydrofon byl použit proto, aby bylo možné oddělit jevy spojené s interakcí bublinky se stěnou od dějů souvisejících s vyzařováním rázových vln do okolní tekutiny. Schémata experimentu s doplněním PVDF hydrofonu připojeného na zesilovač jsou na Obr. 3.7 a 3.8. Základem PVDF hydrofonu je malý kousek piezoelektrické fólie která je umístěna a elektricky spojena se špičkou hydrofonu. Právě špička hydrofonu je nejcitlivějším místem na snímání tlaku. Proto byl samotný hydrofon umístěn v dostatečné vzdálenosti od místa výboje, aby nedošlo k jeho případnému poškození od vznikajícího plazmatu (viz obr. 3.6). Citlivost hydrofonu byla dle kalibračního listu výrobce 29 mV/bar.



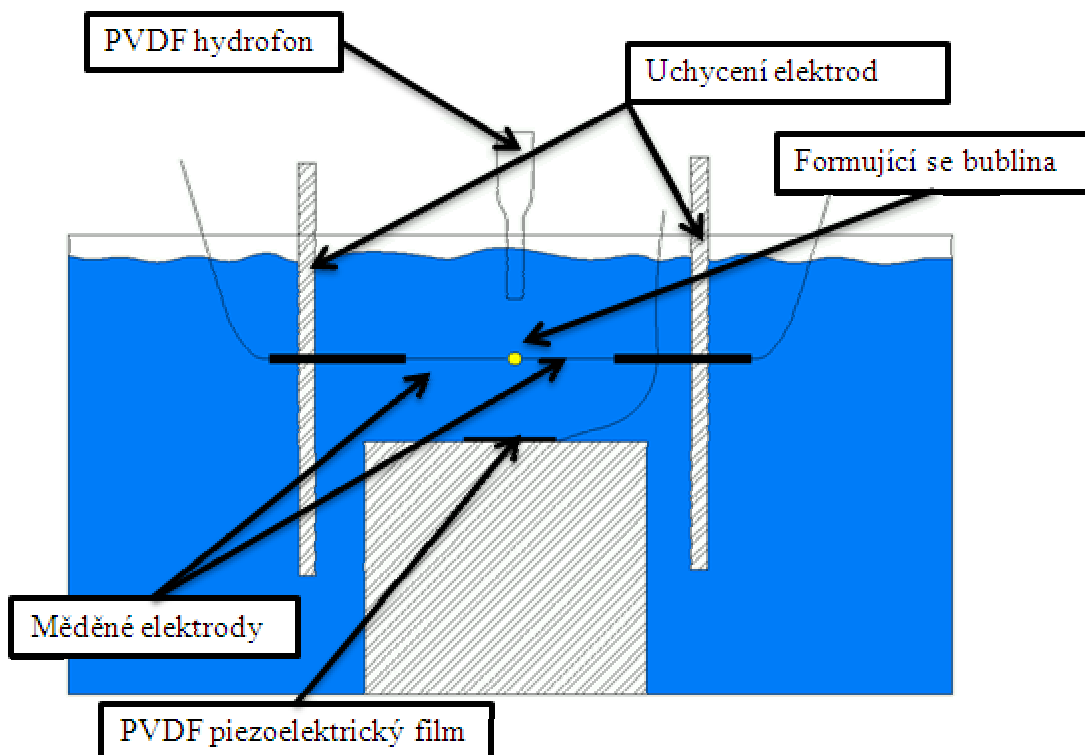
Obr. 3.5: PVDF hydrofon



Obr. 3.6: foto uspořádání v nádobce



Obr. 3.7: schéma experimentu s PVDF filmem a hydrofonem



Obr. 3.8: detail uspořádání v nádobce

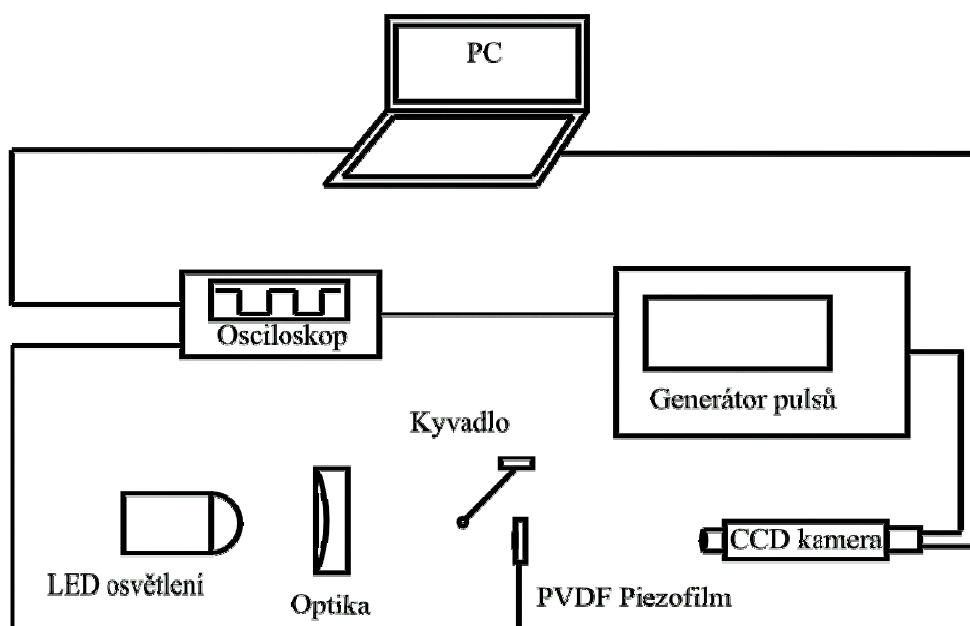
### 3.3 Kalibrace PVDF piezoelektrického filmu:

PVDF piezoelektrické filmy jsou senzory schopné převést mechanickou energii na elektrický signál. Jsou široce používány v různých průmyslových aplikacích. Základem je piezoelektrický jev, při kterém je v piezoelektrickém filmu v důsledku mechanického namáhání generován elektrický náboj. Vzniklý elektrický náboj je přímo úměrný tomuto mechanickému namáhání.

Cílem kalibrace bylo najít závislost napětí (V)-síla (F). Byl použit PVDF piezoelektrický PVDF film sensor DT1-028K W/TH LEADS/RIVET o velikosti 16 mm x 30 mm o celkové tloušťce 40  $\mu\text{m}$ . Základní matricí je PVDF polymer o tloušťce 28  $\mu\text{m}$ . V základní matrici je uložena oboustranná aktivní plocha s elektrodami o velikosti 12 mm x 20 mm. Na povrchu je pak tenká vrstvička uretanového povlaku pro lepší ochranu elektrod.

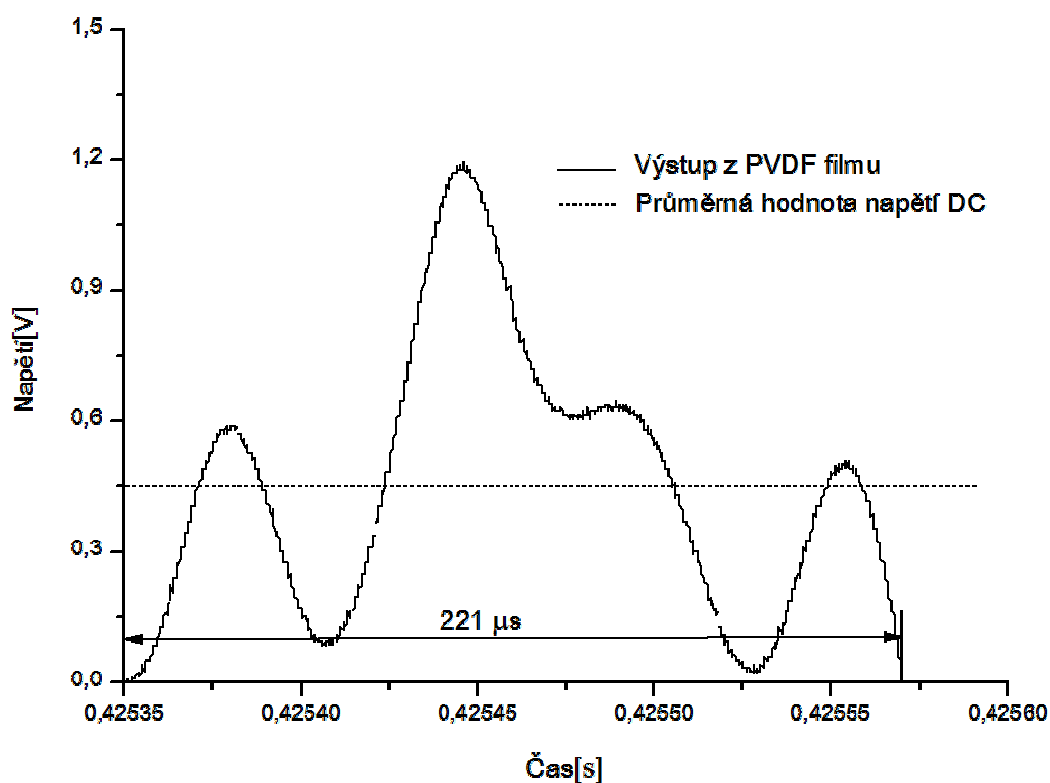
Jednoduchým experimentem bylo ověřeno, že se jedná o integrální snímač. To znamená, že při působení síly na snímač, zůstává elektrický náboj konstantní, nezávisle na velikosti plochy působení síly.

Kalibrace PVDF piezoelektrického filmu byla provedena pomocí ocelové kuličky připevněné provázkem na osu otáčení (viz obr 3.10). Ke kalibraci bylo použito schéma zapojení dle obrázku 3.9.



Obr. 3.9: schéma kalibrace

Základem měření bylo spuštění kuličky ze známé výšky  $h_1$  a vyhodnocení výšky odrazu  $h_2$ . Jednoduchý proces měření spočíval v tom, že v okamžiku spuštění systému se naráz spustí vysokofrekvenční kamera a zároveň se mechanicky uvolní podpora pod kuličkou. Dopadem kuličky na piezoelektrický film, který je připevněn polypropylenovou lepicí páskou na pevnou podložku, vznikne elektrický signál. Signál z PVDF filmu je veden do osciloskopu, kde je zároveň digitalizován a následně pak přenášen do prostředí softwaru LabVIEW-signalexpess. Následnou analýzou v tomto software jsme získali dobu působení kuličky na film a také průměrnou hodnotu napětí DC (viz obr. 3.8), pomocí kterého je možno stanovit kalibrační křivku.



Obr. 3.8: stanovení průměrné hodnoty napětí DC

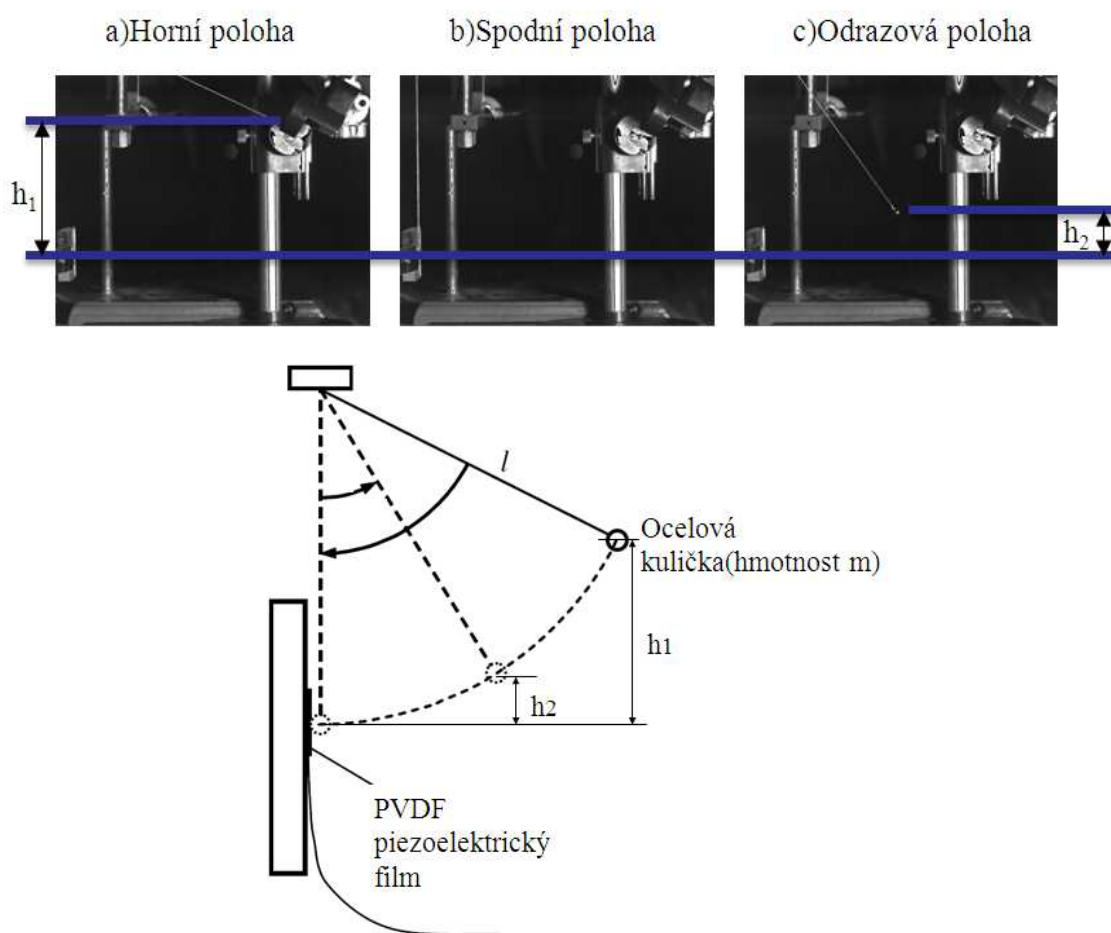
Celkem bylo provedeno osm měření s dvěma různými kuličkami. Síla působící na piezoelektrický film byla určena z:

$$F_i = \frac{m}{\tau} (v_1 - v_2) \quad [3]$$

Kde  $m$  je hmotnost kuličky,  $\tau$  je čas působení, který byl přímo odečten ze signálu osciloskopu a  $v_1$  a  $v_2$  jsou rychlosti před a po nárazu určené ze vztahu:

$$v_{1,2} = \sqrt{2gh_{1,2}} \quad [4]$$

Počáteční výška  $h_1$  a výška odrazu  $h_2$  byly určeny z přímo z fotografií (viz obr 3.10). Například měření číslo osm bylo prováděno kuličkou o hmotnosti 0,0023 kg. Z fotografií byla určena výška  $h_1=0,147$  m a  $h_2= 0,042$  m. Na obr. 3.8 je vidět výstup z PVDF filmu, ze kterého je možné odečíst  $\tau = 0,000221$  s. Dosazením do výše uvedených vztahů dostaneme sílu  $F= 27,24$  N.

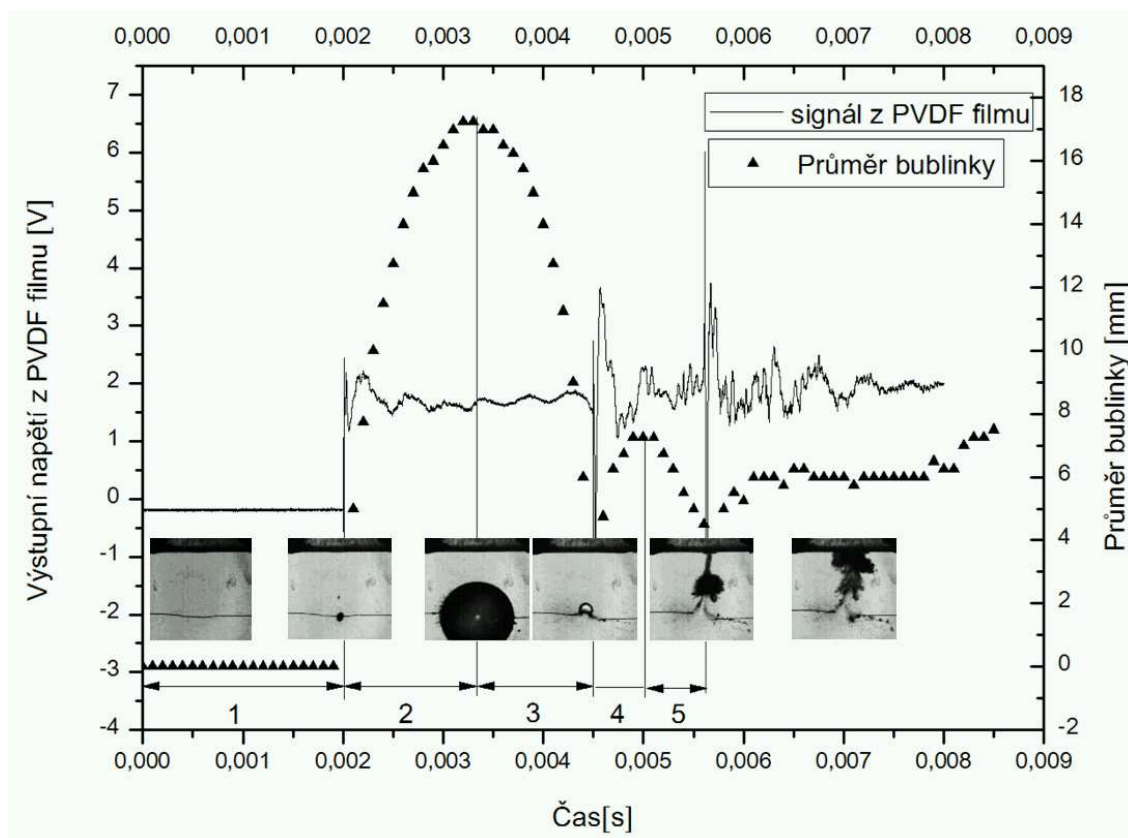


Obr. 3.10: kalibrace piezoelektrického filmu

### 3.4 Metodika vyhodnocování:

Aby bylo možné vyhodnotit experimenty, je nutné data podrobně analyzovat. Porovnáním sady snímků z vysokofrekvenční kamery a signálu z PVDF filmu je možné popsat nejen průběh kolapsu bublinky v blízkosti stěny, ale i ostatní děje které s tímto kolapsem souvisí.



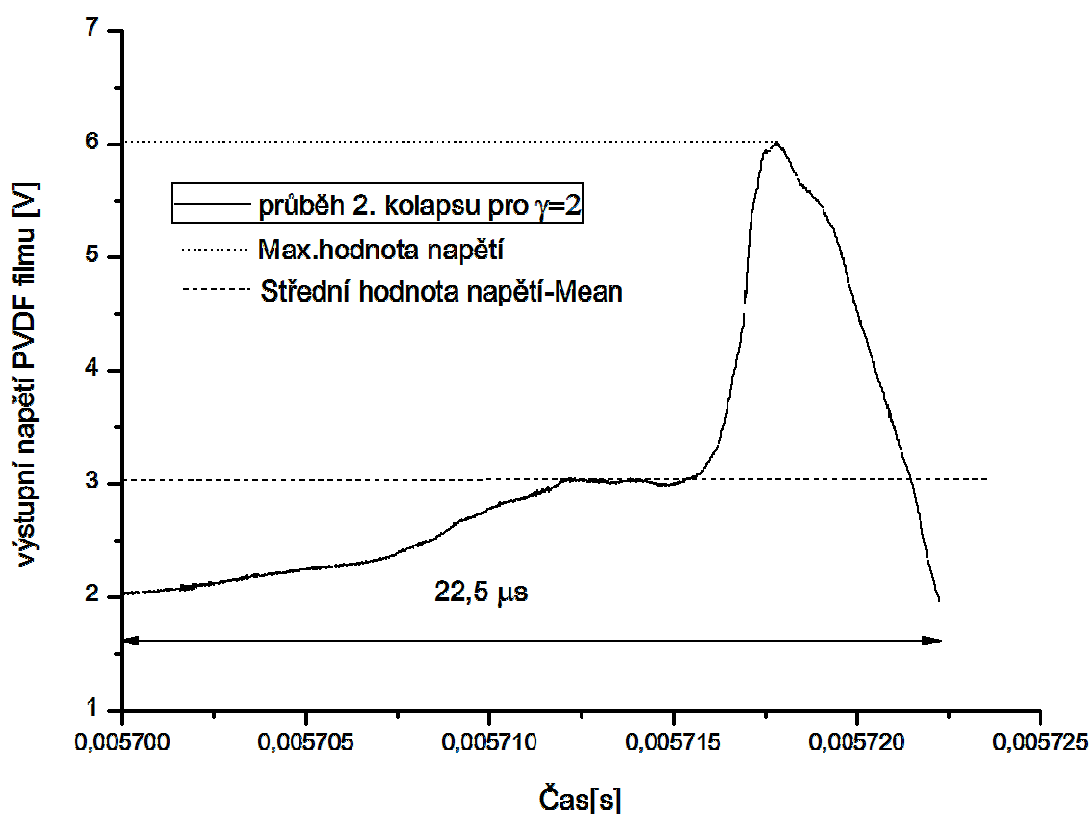


Obr. 3.11: typický průběh signálu

Na obrázku 3.11 je vidět typický průběh signálu z PVDF piezoelektrického filmu, zde pro parametr  $\gamma=2$ . Čas  $t=0$  odpovídá spuštění celého systému. V oblasti číslo 1 je vidět zpoždění dvě milisekundy po sepnutí relé v obvodu s elektrodami. V čase 0,002 ms nastává samotný výboj se vznikem plazmatu a současně začíná růst bublinka. Tato bublinka expanduje v oblasti číslo 2 po dobu 1,3 ms až do bodu, kde byl naměřen maximální průměr bubliny. V tomto okamžiku je tlak okolní kapaliny o hodně větší než uvnitř bubliny. Z tohoto důvodu začne bublina kolabovat. Celý tento kolaps je v oblasti číslo 3. Jestliže je bublina, jako v tomto případě, daleko od stěny, je tvar bublinky během kolapsu kulový a zkolabuje v čase 0,0045. Na vloženém obrázku lze vidět vliv Bjerknesovy síly a tudíž vychýlení bublinky mimo měděné elektrody. V oblasti číslo 4 nastává růst bublinky na druhý maximální poloměr. V důsledku vyšší rychlosti pohybu povrchu bublinky na straně vzdálenější od stěny vzniká v oblasti označené 4 „jet effect“. V oblasti číslo 5 nastává druhý kolaps a dále pak série dalších, již méně významných kolapsů.

### 3.5 Výpočet síly, impuls síly:

Pro výpočet síly působící na stěnu je použita buďto maximální hodnota nebo střední hodnota napětí od prvního a druhého kolapsu. Pro každou tuto hodnotu je pomocí kalibrační křivky určena síla. Například pro hodnotu maximálního napětí 6,02 V (viz obr. 3.12) to je 415 N. Pro střední hodnotu napětí 3,07 V pak 210 N. Tímto je určen základ pro graf závislosti síla kolapsu-poměr  $\gamma$ .



Obr. 3.12: analýza kolapsu

Na obrázku 3. 12 je také vidět výřez průběhu samotného druhého kolapsu pro  $\gamma=2$ . Pro určení impulsu síly je pro nás důležitá délka kolapsu - v tomto případě 22,5  $\mu$ s. Pro výpočet impulsu síly je použit známý vztah [6]:

$$I = F * t \quad [5]$$

V našem případě pak impuls síly pro 415 N a 22,5  $\mu$ s je roven 0,009 N.s.

## 4. Výsledky

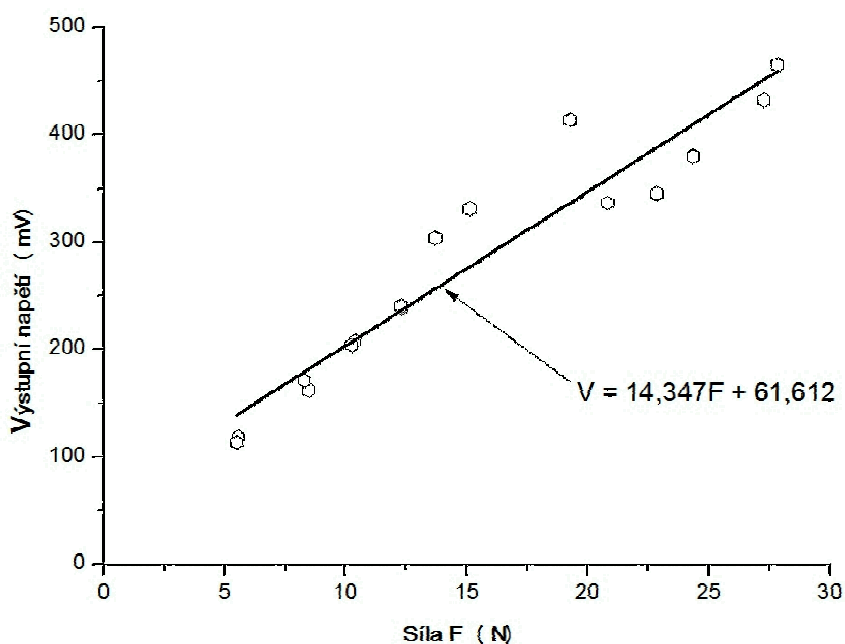
V této kapitole jsou shrnuty všechny výsledky z experimentů včetně kalibrace PVDF filmu. K výsledkům je také připojen komentář s odkazem na příslušné přílohy.

### 4.1 Výsledky kalibrace:

Závislost výstupního napětí na působící síle získaná pomocí kalibračního testu je na Obr. 4.1. Lineární regresí dat lze získat rovnici, představující přímku, jejíž směrnice udává citlivost PVDF filmu ve tvaru

$$U[mV] = 14,347 F[N] + 61,612 \quad [6]$$

Této závislosti pak bylo využito pro určení velikosti síly prvního a druhého kolapsu. Porovnáním s daty, které poskytuje výrobce (13.0 mV/N) jsme dosáhli poměrně dobré shody.

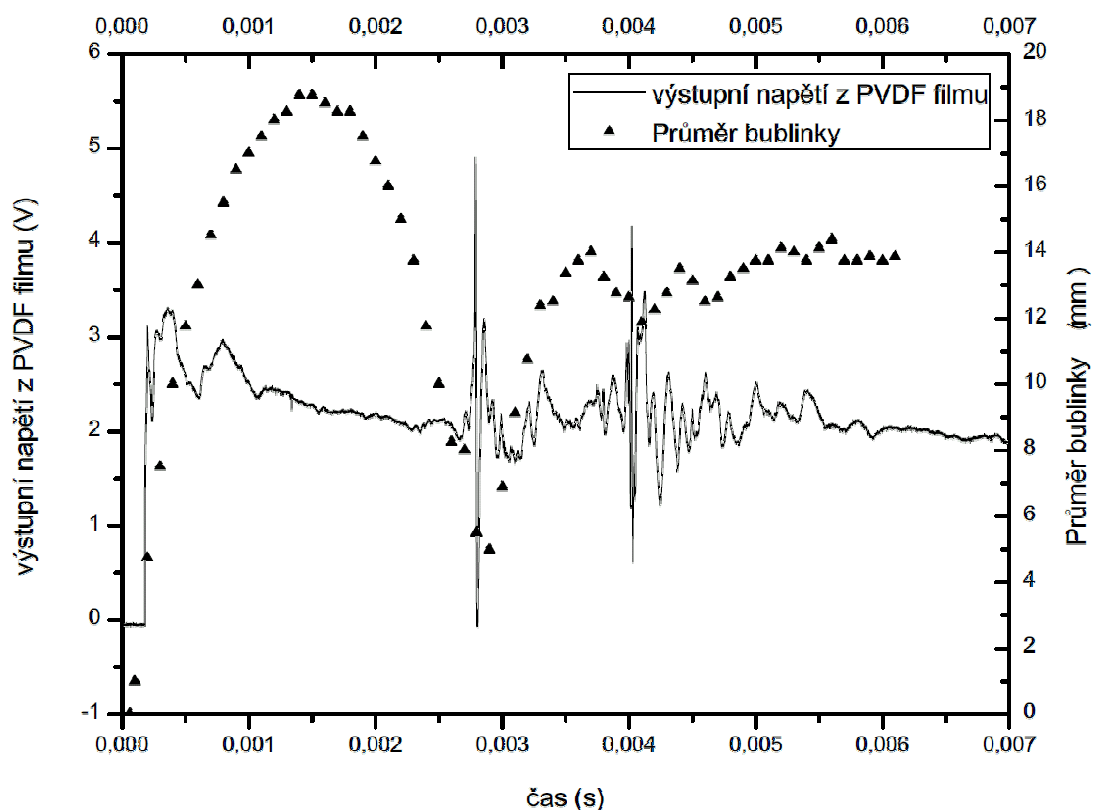


Obr. 4.1: výsledná kalibrační křivka

### 4.2 Experiment s PVDF filmem:

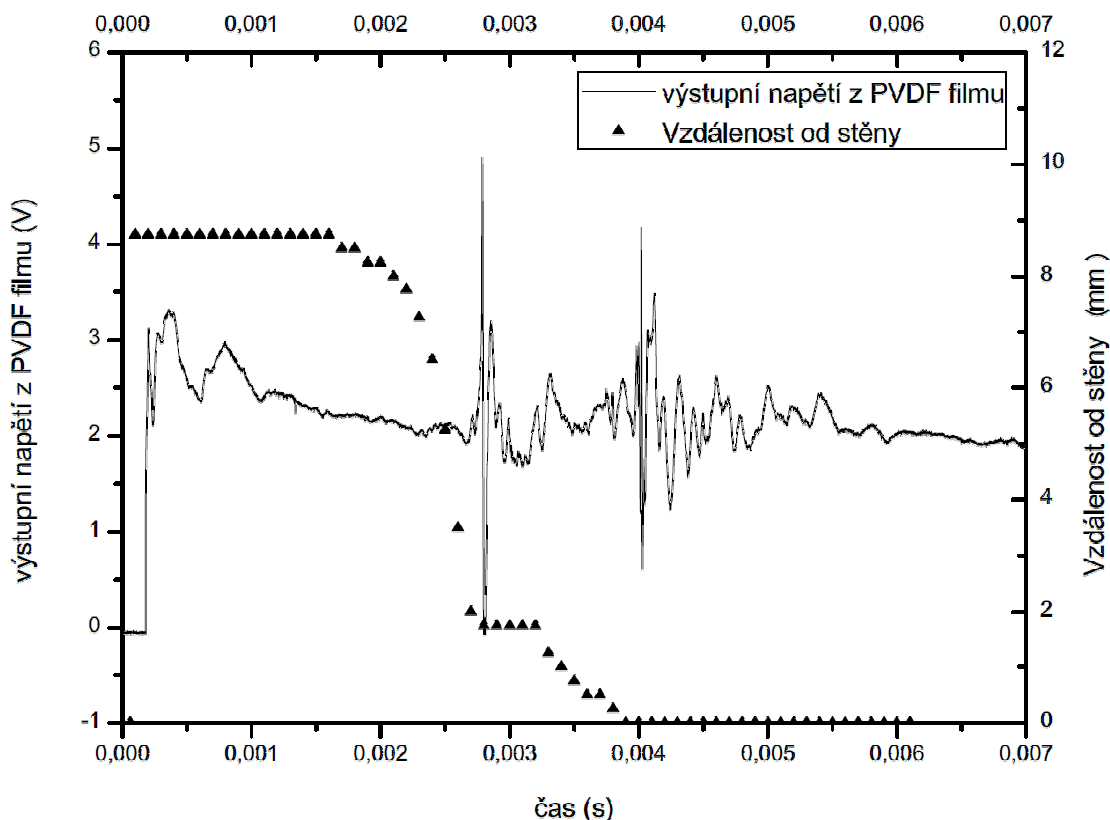
V následující kapitole jsou představeny typické příklady závislosti výstupního signálu z PVDF filmu na čase. Jako typické závislosti byla vybrána měření pro poměry  $\gamma = 0,9$ ,  $\gamma = 2,1$ ,  $\gamma = 2,9$ . Pro lepší ilustraci je společně se signálem z PVDF filmu uvedena

závislost průměru bublinky na čase a dále pak závislost vzdálenosti bublinky od stěny na čase.



Obr. 4.2: Závislost průměru kavitační bublinky na čase pro  $\gamma=0,9$

Na obrázku 4.2 a také v příloze číslo 7 jsou vidět výsledky pro parametr  $\gamma = 0,9$ . Z grafu je zřejmé, že růst bublinky začínal v čase 200  $\mu$ s. Bublinka dosahovala maximálního průměru 19 mm v čase 1,5 ms, kde nastával začátek kolapsu bublinky. Bublinka kolabovala po dobu 1,3 ms. Celý průběh vývoje bublinky a prvního kolapsu tak trval přibližně 2,6 ms. Celý proces prvního kolapsu neprobíhal sféricky. Je to způsobeno relativní blízkostí stěny. Po prvním kolapsu následovala druhá expanze bublinky, která dosáhla maximální hodnoty 14 mm a zkolabovala v čase 4,2 ms. Také je zde zřejmá expanze a kolaps třetí bublinky. Ta dosahovala svého maxima průměru 13,5 mm a kolabovala v čase 4,7 ms. Důležitým zjištěním je i fakt, že druhý a třetí kolaps probíhá přímo na stěně. „Jet effect” není pozorovatelný, avšak jsou zde vidět náznaky „splash efektu”.

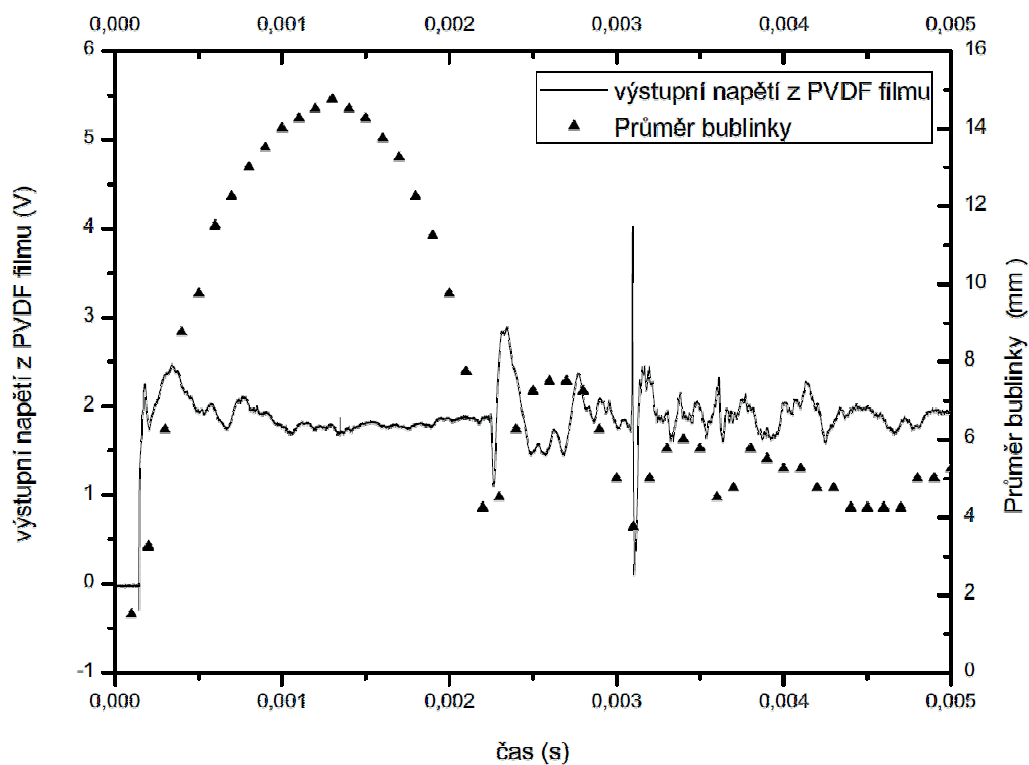


Obr. 4.3: Závislost vzdálenosti kavitační bublinky od stěny na čase pro  $\gamma = 0,9$

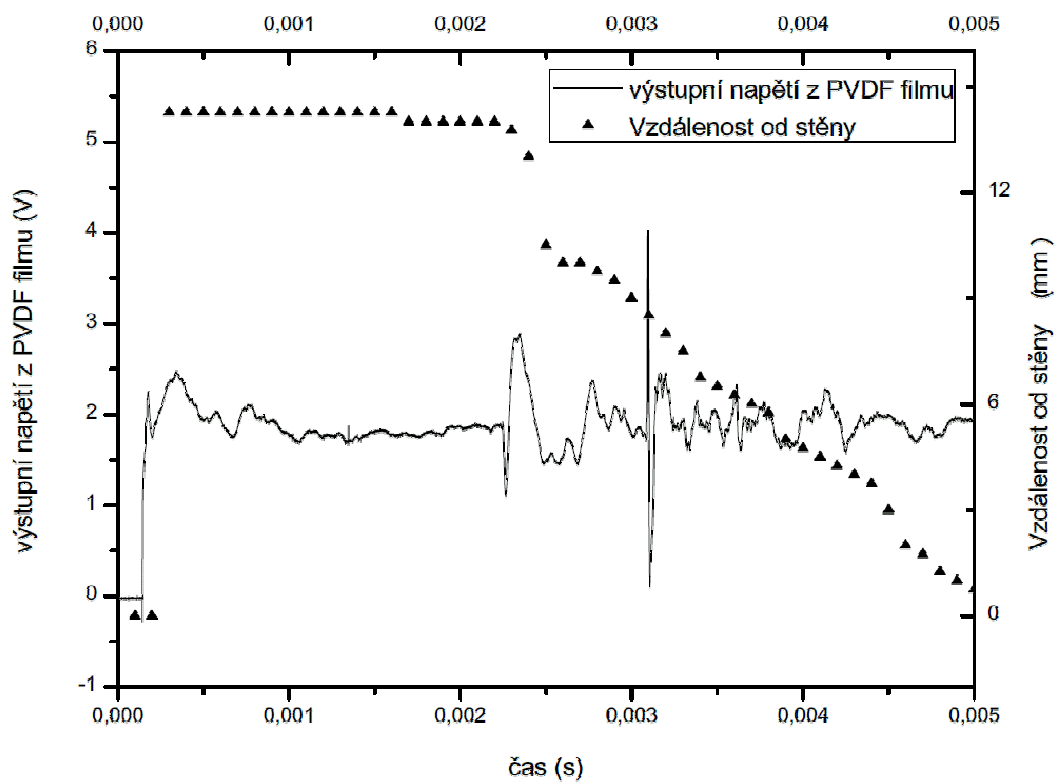
Na obrázku 4.3 je pak vidět závislost vzdálenosti bublinky od stěny. Bublinka se tvoří ve vzdálenosti 9 mm od stěny. Po dosažení svého maxima začne bublinka kolabovat a je zde patrný vliv Bjerknesovy síly, tzn., že bublinka nekolabuje mezi elektrodami, nýbrž se přibližuje ke stěně. Zajímavé je v tomto případě i to, že vzdálenost od stěny při prvním kolapsu neprobíhá lineárně, nýbrž přibližně parabolicky. Po prvním kolapsu nastává prodleva zhruba 0,4 ms, kdy vzdálenost zůstává konstantní. Je to způsobeno růstem bublinky na druhý maximální poloměr. Pak následuje druhý kolaps, při kterém vzdálenost od stěny klesá lineárně. Další děje již probíhají přímo na stěně, tudíž v nulové vzdálenosti. Na výstupním signálu z PVDF filmu je také vidět že první kolaps dosahuje maximální hodnoty 5 V, zatímco druhý kolaps dosahuje nižší hodnoty 4,3 V.

Na obr. 4.4 a v příloze číslo 2 je zobrazen kolaps kavitační bublinky pro  $\gamma = 2,1$ . Zde trvá růst bubliny na první maximální poloměr a první kolaps 2,2 ms, s maximální hodnotou průměru bublinky 15 mm. Kolaps je přibližně sférický. Růst bublinky na druhý maximální poloměr a druhý kolaps trvají 1 ms. Bublinka dosahuje druhého

maximálního průměru 8 mm. Lze ještě vysledovat třetí růst bublinky a kolaps trvající 0,5 ms, s maximálním průměrem 6 mm.

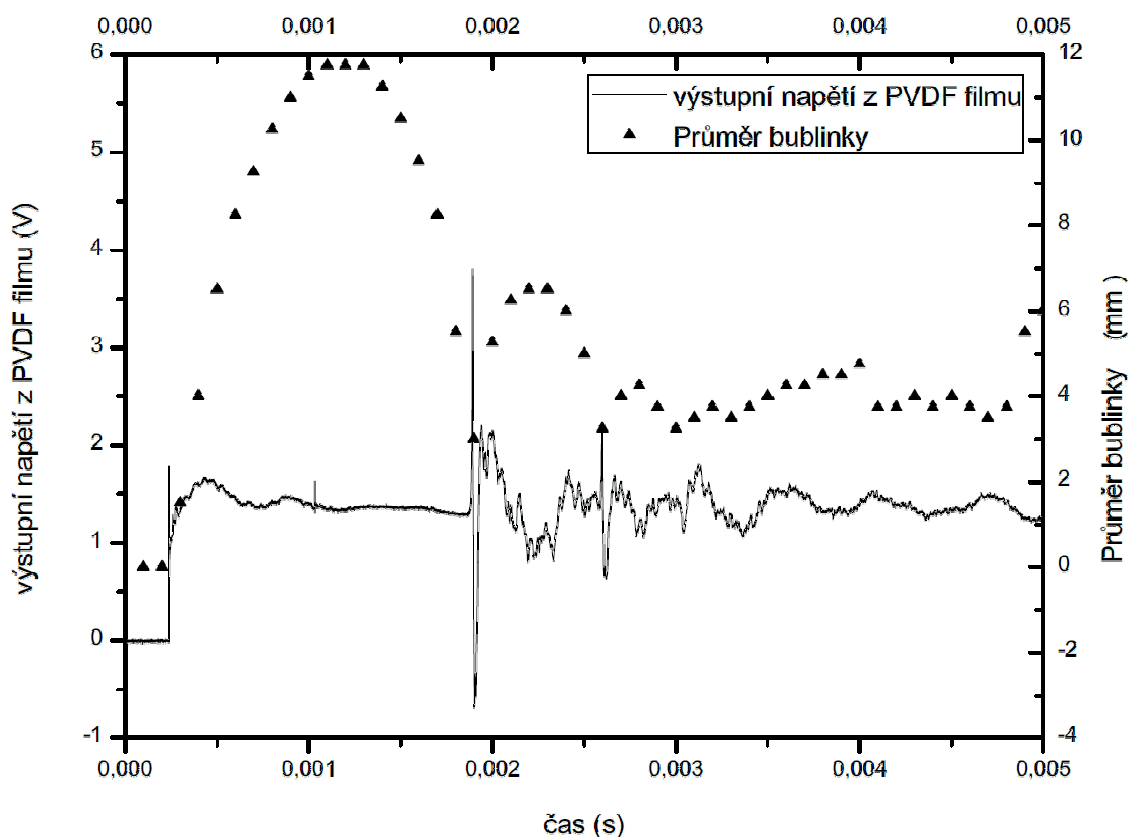


Obr. 4.4: Závislost průměru kavitační bublinky na čase pro  $\gamma = 2,1$



Obr. 4.5: Závislost vzdálenosti kavitační bublinky od stěny na čase pro  $\gamma = 2,1$

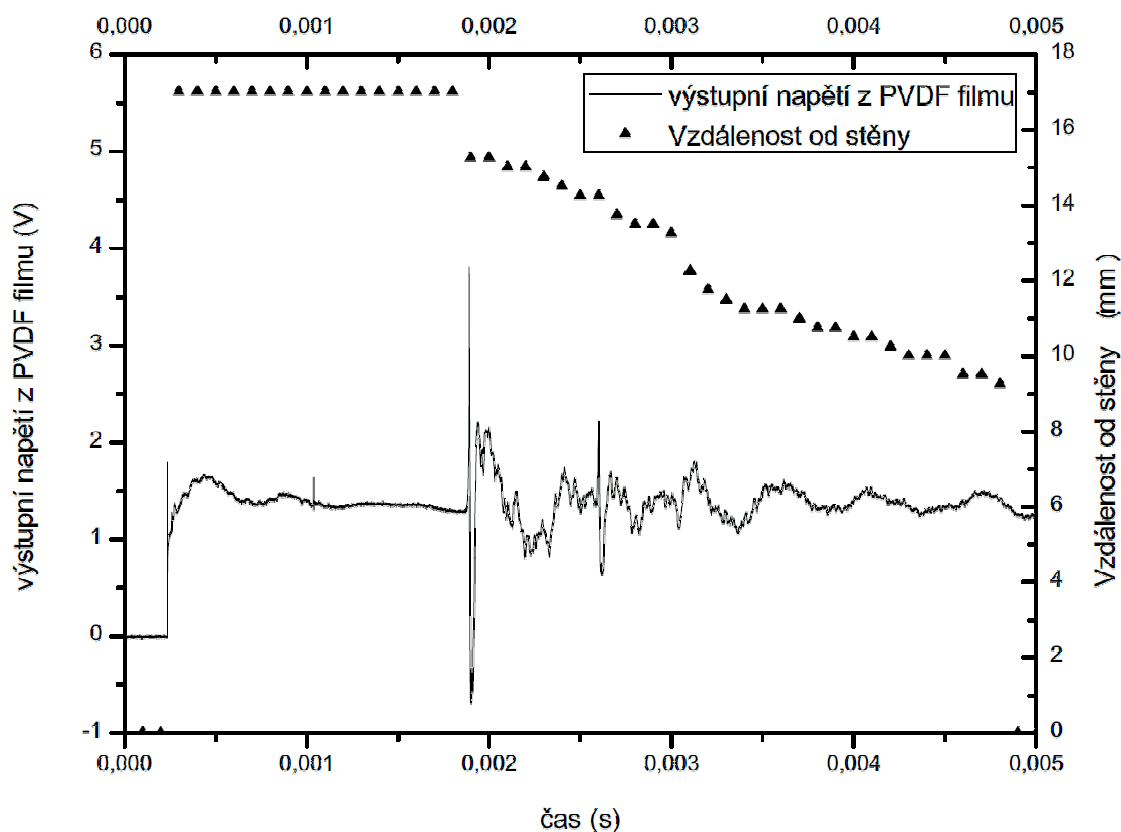
Na dalším obrázku 4.5 je pak vidět závislost vzdálenosti bublinky od stěny pro  $\gamma = 2,1$ . Zde je vidět méně významný vliv Bjerknesovy síly. Z počáteční vzdálenosti 14 mm se začne vzdálenost od stěny snižovat až po prvním kolapsu. Dá se říci, že toto snižování vzdálenosti od stěny je přibližně lineární. Z obrázků pak jde přímo vysledovat existenci „jet efektu“. Je také vidět, že první kolaps dosahuje maximální hodnoty 5,2 V, zatímco druhý kolaps dosahuje nižší hodnoty 4,4 V.



Obr. 4.6: Závislost průměru kavitační bublinky na čase pro  $\gamma = 2,9$

Na obr. 4.6 a v příloze číslo 3 je zobrazen průběh kolapsu kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma = 2,9$ . Celý proces začíná výbojem na 0,3 ms a růstem bublinky až do svého maximálního poloměru 11,8 mm. Poté nastává kolaps bublinky, který trvá cca. 0,7 ms a končí v čase 1,9 ms. Kolaps je přibližně sférický. „Jet effect“ je téměř nepozorovatelný. Po prvním kolapsu následuje růst bublinky až na maximum 6,5 mm a následný druhý kolaps. Druhý kolaps trval cca. 0,35 ms. Třetí kolaps bublinky probíhá z maximálního průměru 4,2 mm po dobu 0,2 ms. Následuje vlna dalších kolapsů, přičemž bublinky se nedostanou do přímého kontaktu se stěnou.

Na dalším obrázku 4.7 je pak vidět závislost vzdálenosti bublinky od stěny pro  $\gamma = 2,9$ . Vliv Bjerknesovy síly je v tomto případě malý, protože bublinka je menšího průměru a je poměrně daleko od stěny. Z počáteční vzdálenosti 17 mm se začne vzdálenost od stěny snižovat až po prvním kolapsu a jako v předchozím případě je toto snižování vzdálenosti od stěny přibližně lineární.



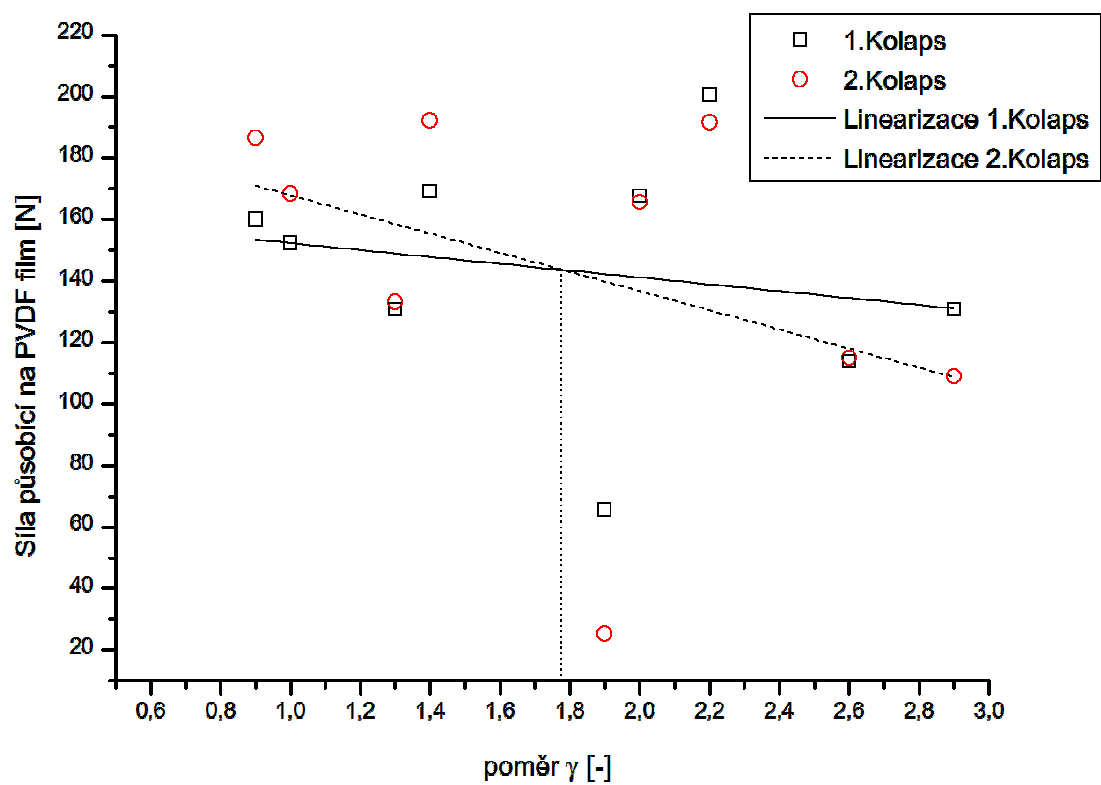
Obr. 4.7: Závislost vzdálenosti kavitační bublinky od stěny na čase pro  $\gamma = 2,9$

#### 4.2.1 Závislost síla F- poměr $\gamma$ :

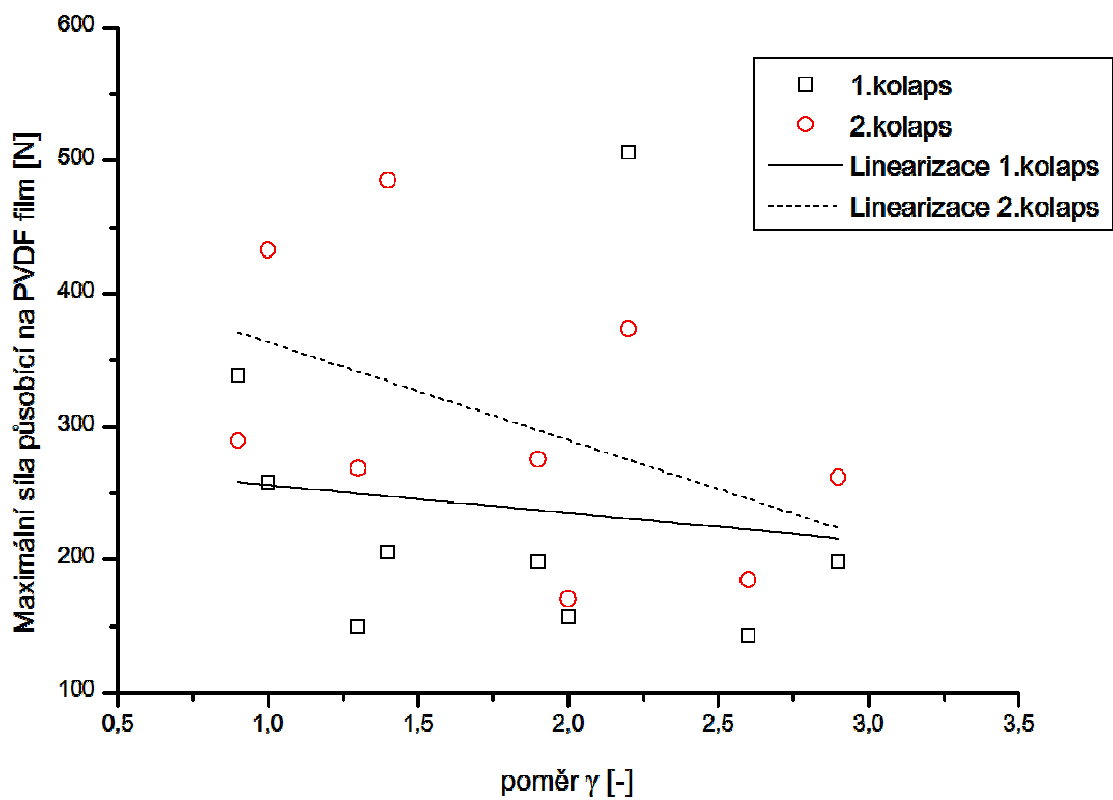
Na obrázku 4.8 jsou zobrazeny síly od prvních a druhých kolapsů pro všechny hodnoty poměrů  $\gamma$  prováděných v tomto experimentu. Hodnoty sil prvních a druhých kolapsů jsou aproximovány pomocí lineární regrese. Síly v tomto případě byly počítány pro střední hodnotu napětí (více kapitola 3.5). Je vidět že aproximační přímky se protínají zhruba na hodnotě  $\gamma = 1,8$ . To znamená, že do této hodnoty má druhý kolaps větší silový účinek než kolaps první. Naopak nad  $\gamma = 1,8$  je již účinek druhého kolapsu nižší nežli účinek prvního kolapsu.

Na obrázku 4.9 je zobrazena závislost maximální síly od kolapsů pro různá  $\gamma$ . Zde platí, že druhý kolaps dosahuje vyšších hodnot až do zhruba  $\gamma = 3$ .



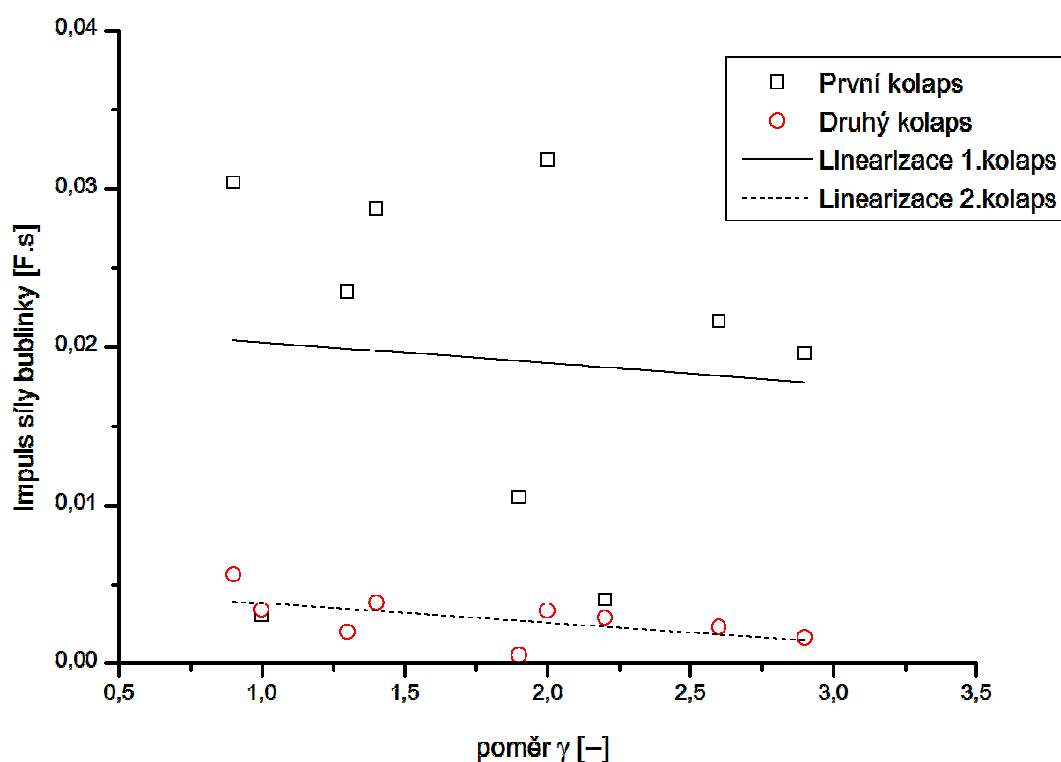


Obr. 4.8: Působící síly na PVDF film za různých  $\gamma$



Obr. 4.9: Maximální potenciální síla od kolapsů za různých  $\gamma$

### 4.2.2 Závislost impuls síly I- poměr $\gamma$ :

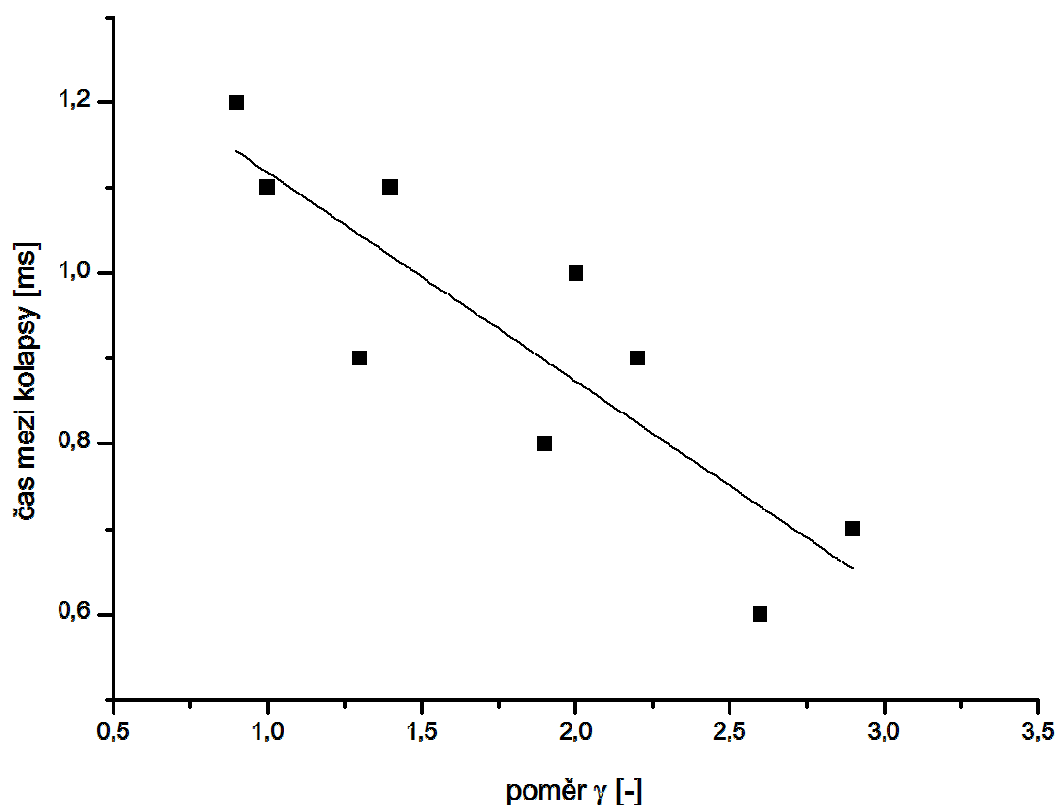


Obr. 4.10: Impulsy sil od kolapsů za různých  $\gamma$

Na obrázku 4.10 je vidět závislost impulsu síly na poměru  $\gamma$ . Zde je jasné patrné, že vyšší účinek má první kolaps nežli kolaps druhý. Průměr impulsu sil pro první kolaps je 0,02 N.s, zatímco pro druhý je to jen 0,003 N.s.

### 4.2.3 Čas mezi kolapsy:

Na dalším obrázku 4.11 je zobrazena závislost prodlevy mezi kolapsy na poměru  $\gamma$ . Z průběhu je patrné, že doba mezi prvním a druhým kolapsem se zkracuje při zvyšujícím se  $\gamma$ . Pro  $\gamma = 0,9$  dosahuje časová prodleva svého maxima a to 1,2 ms. Naopak nejmenší časový rozdíl mezi kolapsy je pro  $\gamma = 2,6$  a to 0,6 ms.

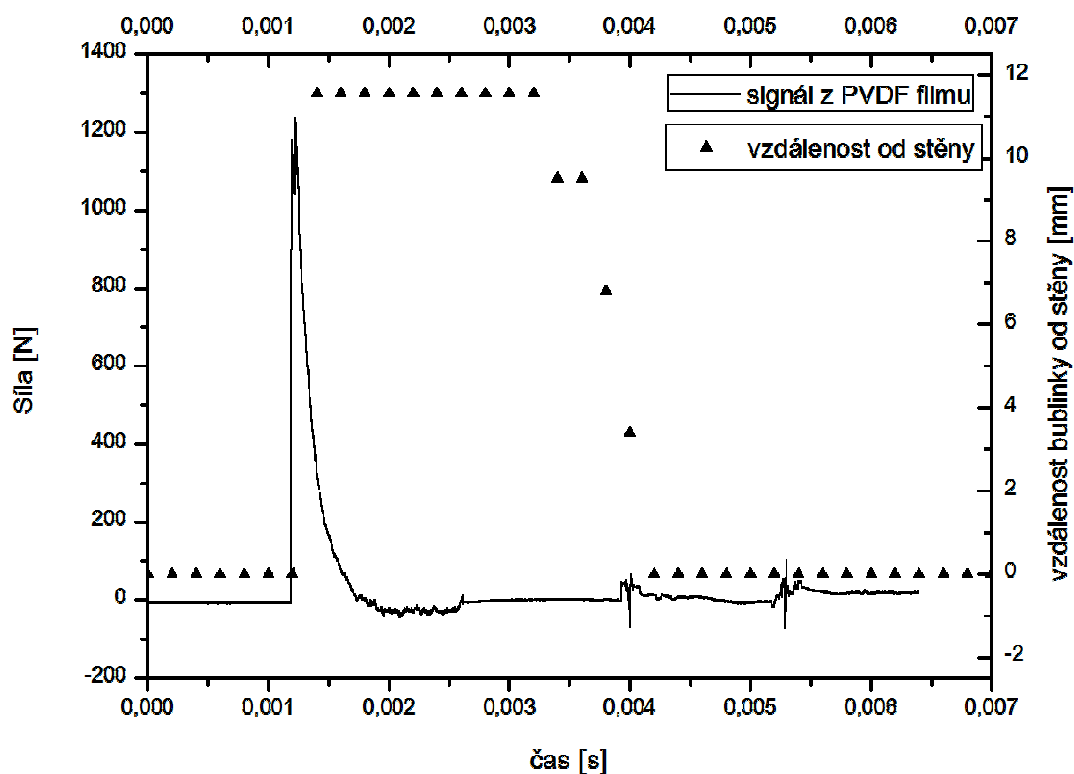


Obr. 4.11: časové intervaly mezi prvním a druhým kolapsem za různých  $\gamma$

### 4.3 Experiment s PVDF filmem a hydrofonem:

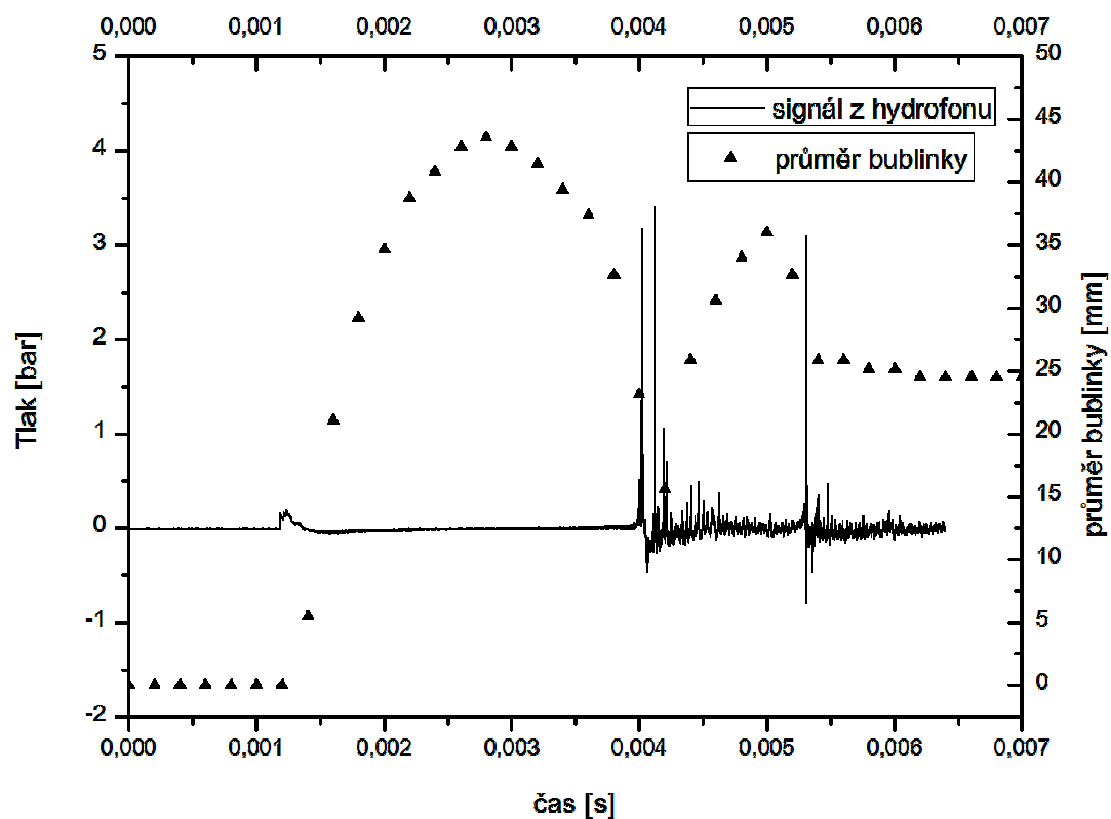
V následující kapitole jsou představeny typické příklady závislosti výstupního signálu z PVDF filmu a z hydrofonu v závislosti na čase. Jako typické příklady byla vybrána měření pro parametry  $\gamma = 0,5$ ,  $\gamma = 0,72$ ,  $\gamma = 1,57$ . Pro lepší ilustraci je pak uvedena závislost průměru bublinky na čase a dále pak závislost vzdálenosti bublinky od stěny také na čase.

Na obrázku 4.12 a v příloze číslo 10 je zobrazen kolaps kavitační bublinky v blízkosti stěny pro  $\gamma = 0,5$ . Při tomto experimentu byla bublinka nejbližší pevné stěně. Výboj nastává v čase 1,4 ms. Na signálu z PVDF filmu je patrné, že výboj má velkou energii a dosahuje maximální hodnoty 1200 N. Bublina roste v maximální vzdálenosti 11,5 mm od stěny, a na této vzdálenosti zůstává přibližně 2,3 ms. Při následném kolapsu se bublinka začne rychle přibližovat ke stěně a v okamžiku první imploze je již na stěně. První kolaps nastává v čase 4 ms a druhý kolaps v 5,3 ms.

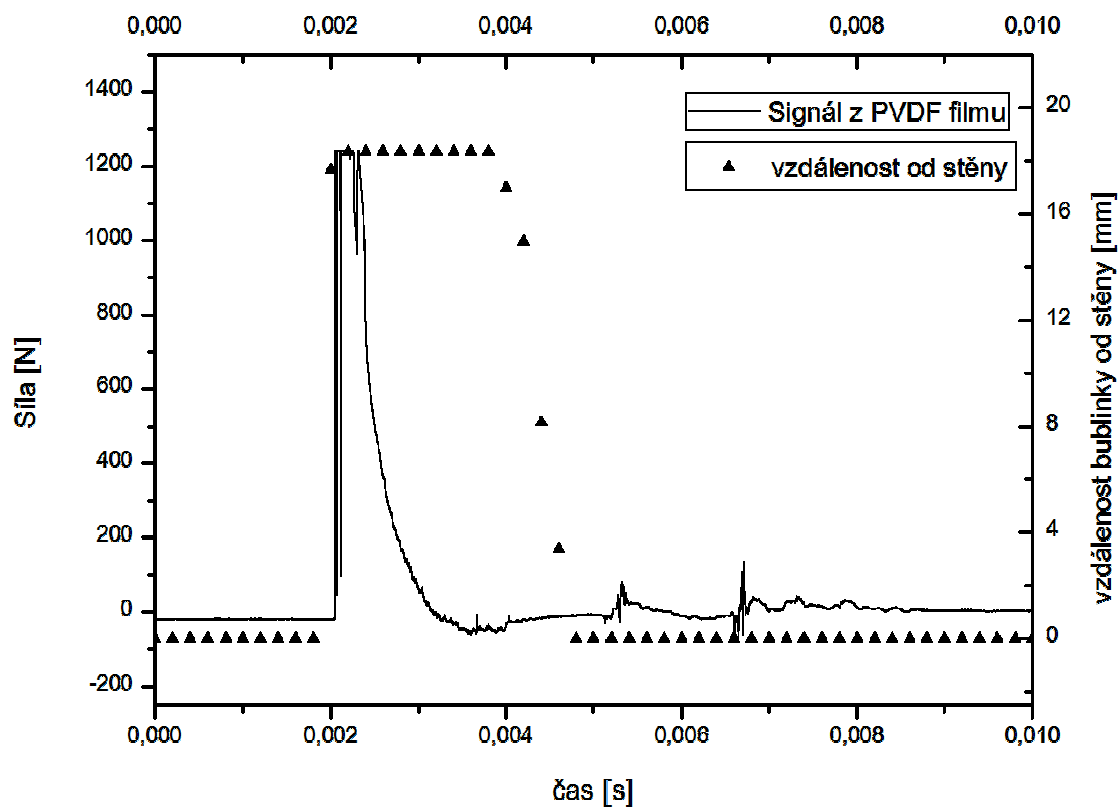


Obr. 4.12: Závislost vzdálenosti kavitační bublinky od stěny na čase pro  $\gamma = 0,5$

Na obrázku 4.13 a v příloze číslo 10 je opět zobrazen kolaps kavitační bublinky od stěny na čase pro  $\gamma = 0,5$ . Je zde vidět signál z hydrofonu a také Závislost průměru bublinky na čase. Bublinka roste po dobu 1,6 ms až na maximum průměru 44 mm. Vlivem blízké stěny vniklá bublina není sférická. První kolaps probíhá po dobu 1,4 ms a dochází k němu v čase 4,2 ms. Následuje druhý růst bubliny po dobu 1 ms až na maximální rozměr 37 mm. V tomto případě se již bublince nedá přiřadit průměr, jelikož na stěně tvoří nepravidelný tvar. Tyto hodnoty jsou stanoveny maximálními horizontálními a vertikálními rozměry. Ke druhému kolapsu dojde v čase 5,4 ms. Tlak na hydrofonu zaznamenal maximální hodnoty u obou kolapsů cca. 3 bary. „Jet effect“ a „splash effect“ nebyl pozorován.



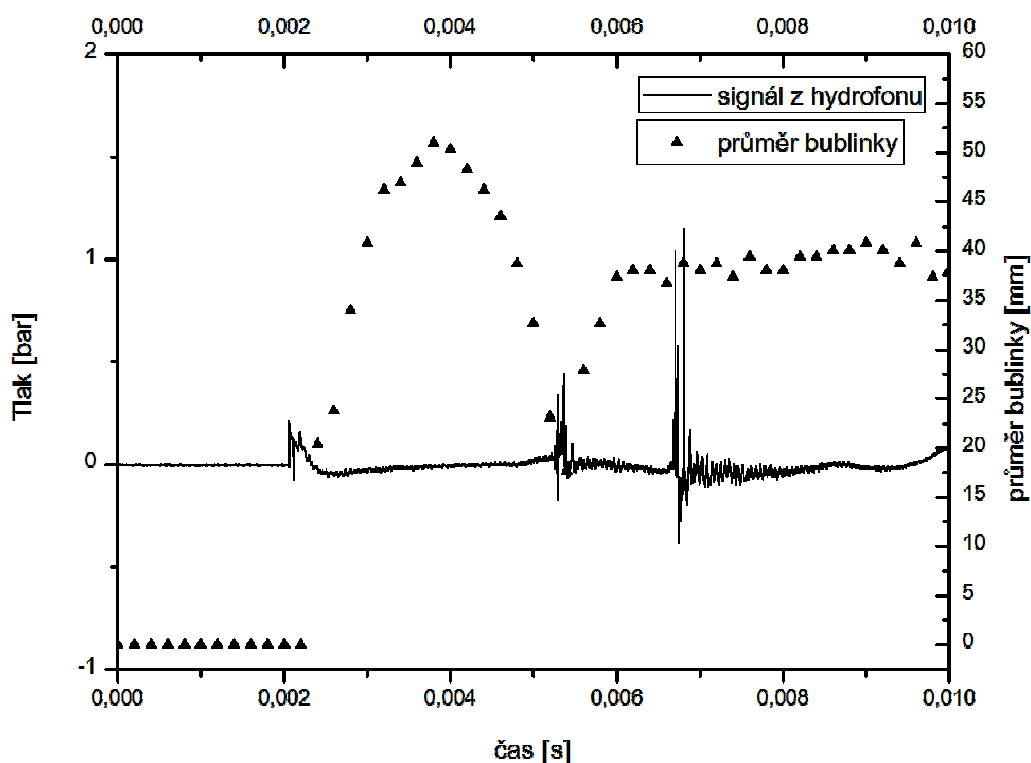
Obr. 4.13: Závislost průměru bublinky na čase pro  $\gamma = 0,5$



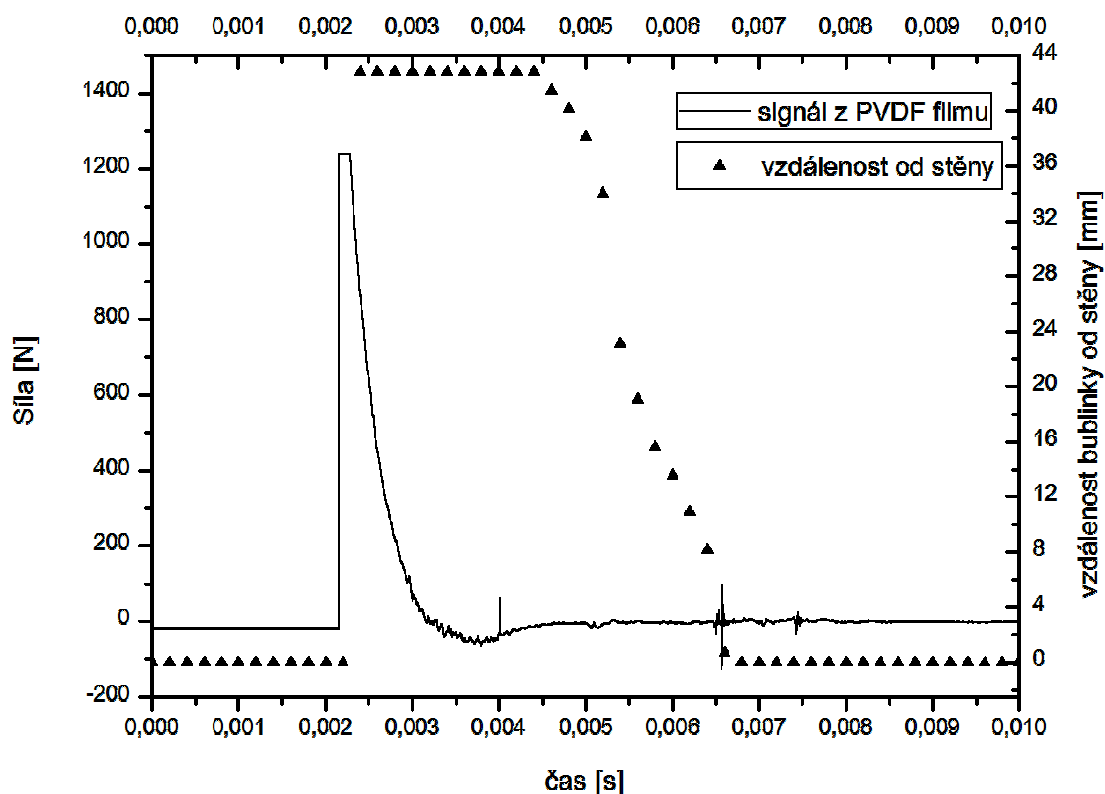
Obr. 4.14: Závislost vzdálenosti kavitační bublinky od stěny na čase pro  $\gamma = 0,72$

Na obrázku 4.14 a v příloze číslo 12 je zobrazen kolaps kavitační bublinky v blízkosti stěny pro  $\gamma = 0,72$ . Na signálu z PVDF filmu je vidět, že výboj nastává v čase 2 ms. První kolaps se odehrává v čase 5,3 ms a druhý kolaps v čase 6,8 ms. Maximální síla pro první kolaps je 72 N, zatímco pro druhý kolaps je to 142 N. To značí, že druhý kolaps má dvojnásobný silový účinek. Růst bubliny probíhá sféricky ve vzdálenosti 17 mm od stěny. Kolaps je ovlivněn blízkostí stěny a neprobíhá sféricky. V důsledku vlivu přítomnosti stěny se bublina v čase 4 ms začne přibližovat ke stěně. Přibližování bublinky ke stěně má přibližně lineární charakter. V čase 4,4 ms je již střed bublinky na stěně, tudíž jak první tak i druhý kolaps probíhají přímo na stěně.

Na obrázku 4.15 je zobrazena závislost průměru bublinky na čase pro  $\gamma = 0,72$  se zobrazením signálu z hydrofonu. Bublina roste po dobu 1,8 ms až na maximální průměr 53 mm. Kolaps probíhá po dobu 1,4 ms. Následuje druhý růst bublinky až na průměr 37 mm a druhý kolaps. „Jet effect“ není ze snímků pozorovatelný. Jeho přítomnost se ale dá vydedukovat z faktu, že se zde vyskytuje „splash effect“, který je na přítomnost „jet efektu“ vázán.



Obr. 4.15: Závislost průměru bublinky na čase pro  $\gamma = 0,72$

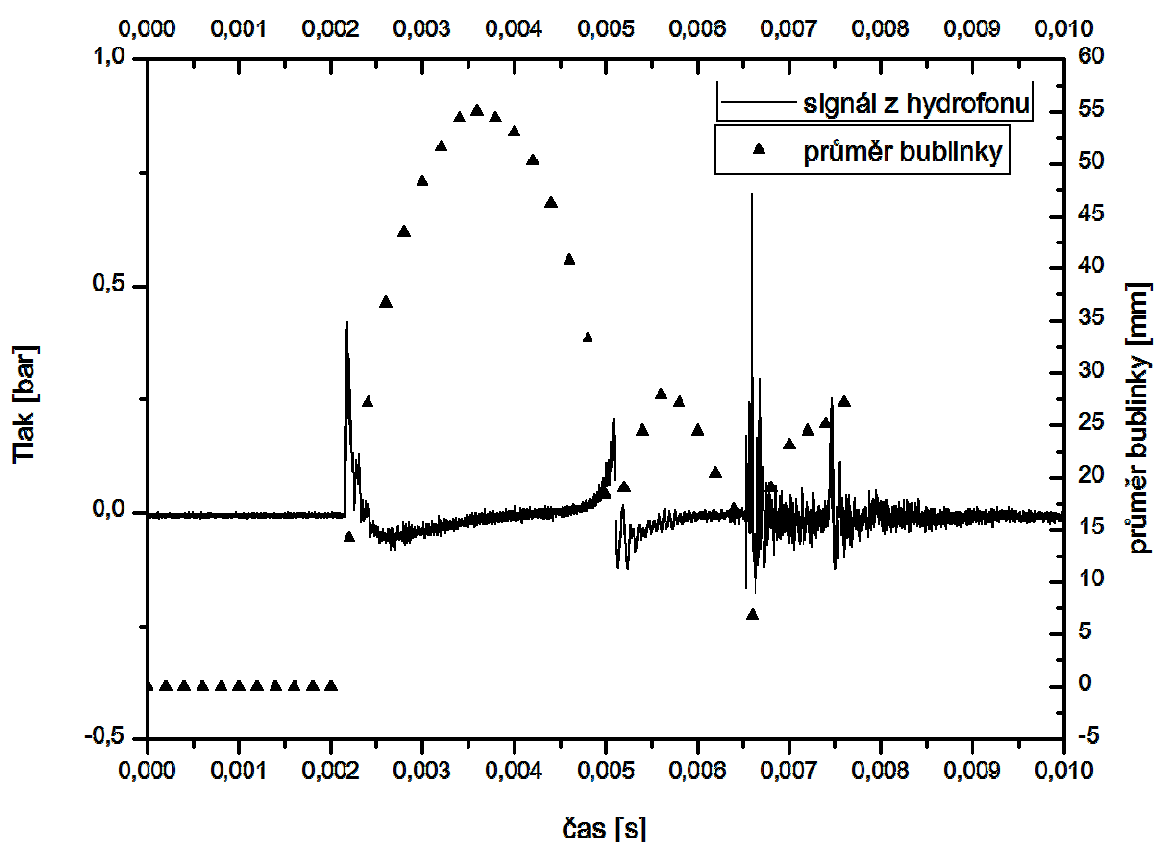


Obr. 4.16: Závislost vzdálenosti kavitační bublinky od stěny na čase pro  $\gamma = 1,57$

Na obrázku 4.16 a v příloze číslo 18 je zobrazen kolaps kavitační bublinky v blízkosti stěny pro  $\gamma = 1,57$ . Při tomto experimentu byla bublinka nejdále od pevné stěny. Na signálu z PVDF filmu je vidět že výboj nastává v čase 2,2 ms. První kolaps se odehrává v čase 5,3 ms a druhý kolaps v čase 6,6 ms. Je zajímavé, že první kolaps je na signálu z PVDF filmu skoro neznatelný a dosahuje silové hodnoty jen 11 N. Pro druhý kolaps je to 100 N. Růst i kolaps první bubliny probíhá přibližně sféricky ve vzdálenosti 43 mm od stěny. Kolaps je ovlivněn blízkostí stěny a neprobíhá sféricky. V důsledku vlivu přítomnosti stěny se bublina v čase 4,4 ms začne přibližovat ke stěně. Přibližování bublinky ke stěně má přibližně lineární charakter. Při prvním kolapsu a je zde patrný vliv Bjerknesovy síly, tzn., že bublinka nekolabuje mezi elektrodami, nýbrž se přibližuje ke stěně. První kolaps probíhá ve volném prostoru, zatímco druhý kolaps již probíhá na stěně.

Na obrázku 4.17 a v příloze číslo 18 je zobrazena závislost průměru bublinky na čase pro poměr  $\gamma = 1,57$  se zobrazením signálu z hydrofonu. Je zde vidět že bublinka roste po dobu 1,5 ms až na průměr 56 mm. Následuje první kolaps trvající 1,8 ms. Růst druhé bublinky trvá po dobu 0,5 ms a dosahuje svého vrcholu na 26 mm. Druhý kolaps

bublínky probíhá po dobu 0,7 ms. Pro tento případ je výrazný vliv „Jet efektu“, který je pozorovatelný i na kinogramech v příloze číslo 18. „Splash effect“, se zde nevyskytuje.



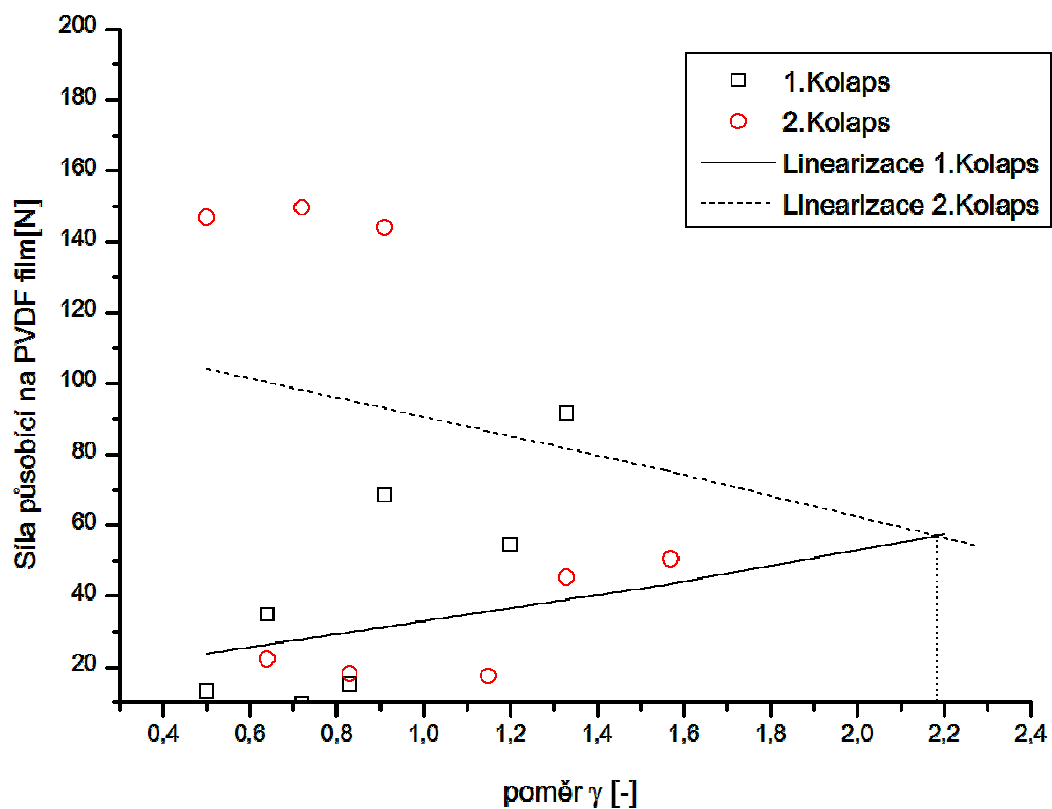
Obr. 4.17: Závislost průměru bublinky na čase pro  $\gamma = 1,57$

#### 4.3.1 Závislost síla F- poměr $\gamma$ :

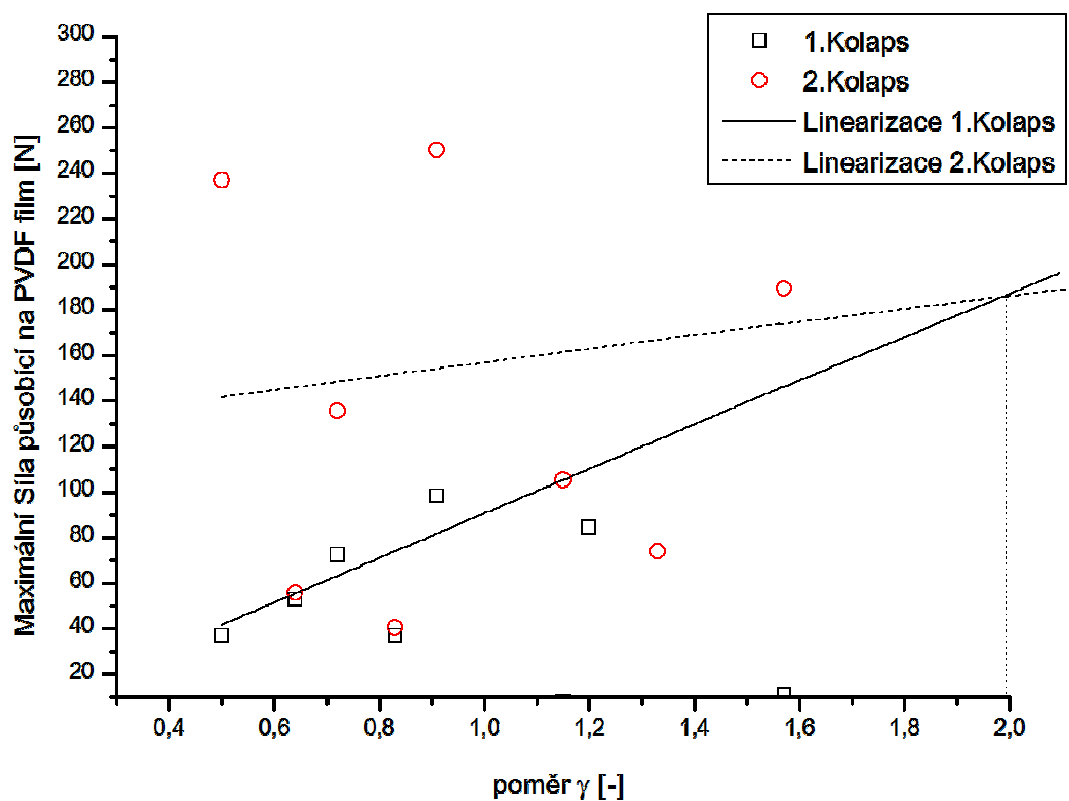
Na obrázku 4.18 jsou zobrazeny síly od prvních a druhých kolapsů pro všechny hodnoty poměru  $\gamma$  prováděných v tomto experimentu. Hodnoty sil prvních a druhých kolapsů jsou aproximovány pomocí lineární regrese. Síly v tomto případě byly počítány pro střední hodnotu napětí. Je vidět že přímky prvních a druhých kolapsů se protínají zhruba na hodnotě  $\gamma = 2,2$ . To znamená, že do této hodnoty má druhý kolaps větší silový účinek nežli kolaps první. Naopak nad  $\gamma = 2,2$  je již účinek druhého kolapsu nižší nežli účinek prvního kolapsu.

Na obrázku 4.19 je zobrazena závislost maximální potenciální síly od kolapsů za různých  $\gamma$ . Zde platí, že druhý kolaps dosahuje vyšších hodnot až do zhruba  $\gamma = 2$ .





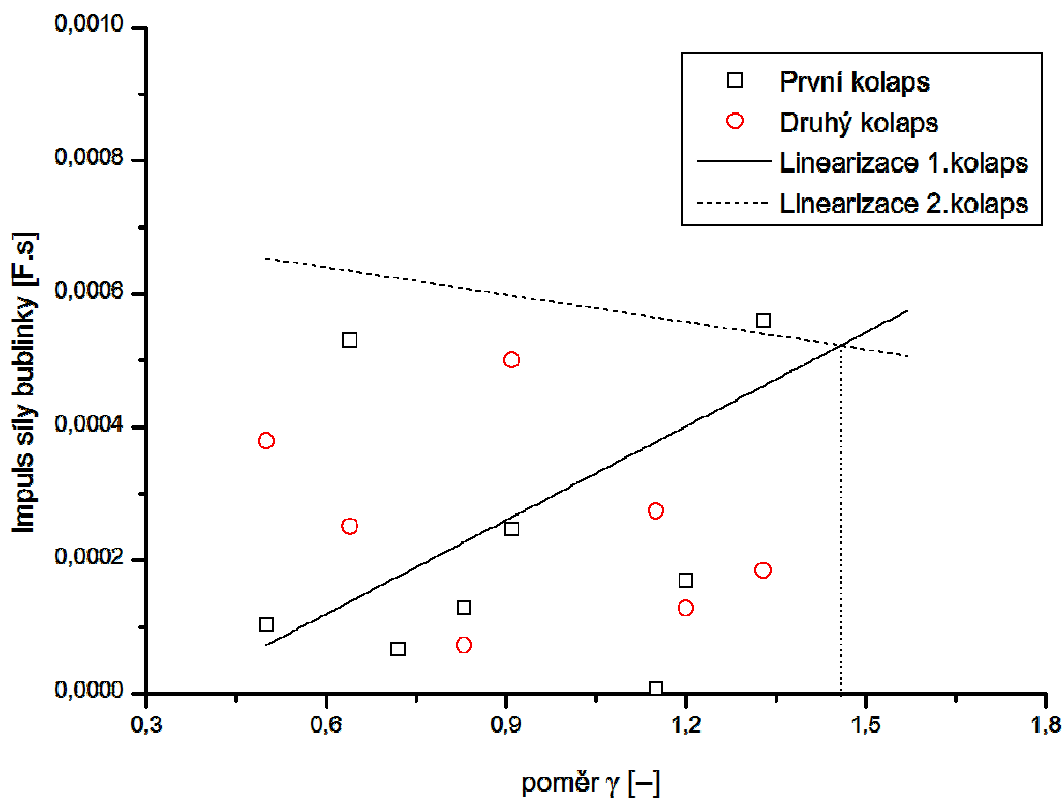
Obr. 4.18: Působící síly na PVDF film za různých  $\gamma$



Obr. 4.19: Maximální potenciální síla od kolapsů za různých  $\gamma$

### 4.3.2 Závislost impuls síly- poměr $\gamma$ :

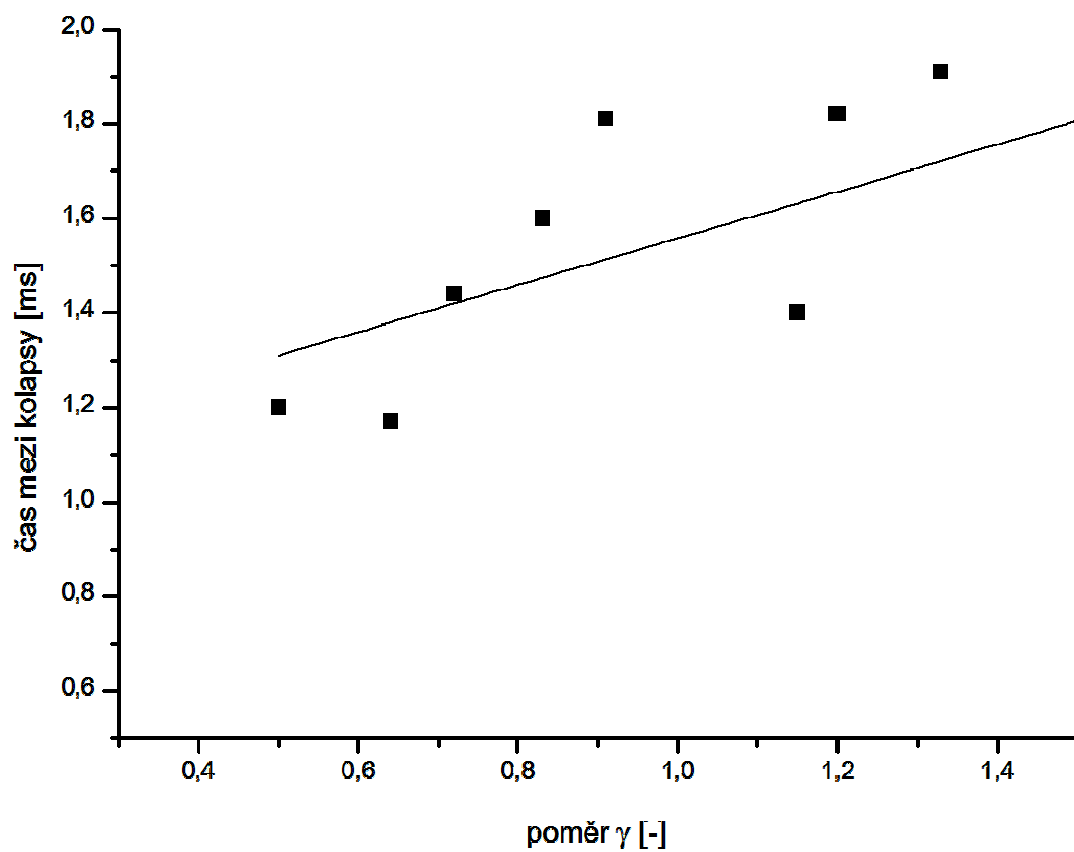
Impuls síly v závislosti na poměru  $\gamma$  je na Obr. 4.20. Na obrázku vidíme, že vyšší impuls síly je od druhého kolapsu až do hodnoty  $\gamma = 1,45$ . Pro hodnoty  $\gamma > 1,45$  má převahu již první kolaps.



Obr. 4.20: Impulsy sil od kolapsů za různých  $\gamma$

### 4.3.3 Čas mezi kolapsy:

Na dalším obrázku 4.21 je zobrazena závislost prodlevy mezi kolapsy na poměru  $\gamma$ . Z průběhu je patrné, že doba mezi prvním a druhým kolapsem má tendenci se prodlužovat při zvyšujícím se  $\gamma$ . Pro  $\gamma = 1,33$  dosahuje časová prodleva svého maxima a to 1,9 ms. Naopak nejmenší časový rozdíl mezi kolapsy je pro  $\gamma = 0,72$  a to 1,15 ms.



Obr. 4.21: časové intervaly mezi prvním a druhým kolapsem za různých  $\gamma$

## 5. Závěr

V práci byla provedena studie kolapsu kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny. Z hlediska potenciálního poškození od bublinky byly sledovány zejména účinky prvního a druhého kolapsu. Účinky kolapsů byly kvantifikovány jak maximální silou kolapsu, tak pro srovnání střední silou kolapsu. Dalšími sledovanými faktory byly impuls síly a doba mezi jednotlivými kolapsy.

Pro měření účinků kolapsů byly sestaveny dva nezávislé experimenty. První experiment s využitím PVDF piezoelektrického filmu. Druhý experiment pak s využitím PVDF filmu a také PVDF hydrofonu, který sloužil k detekci projevů kolapsu dále od stěny. Chování bublinek v blízkosti pevné stěny bylo sledováno pomocí vysokorychlostní kamery. První skupina experimentů byla provedena pro hodnoty poměru  $\gamma = 0,9-2,9$ . Druhá skupina experimentů byla provedena pro hodnoty poměru  $\gamma = 0,5-1,5$ .

Z měření interakce bublinky se stěnou bylo zjištěno, že pro nižší hodnoty poměru  $\gamma$  má větší silové účinky druhý kolaps. Naopak pro vyšší hodnoty poměru  $\gamma$  se naopak stává dominujícím první kolaps. Mezní hodnota  $\gamma$  od které je první kolaps intenzivnější než druhý leží v oblasti  $1,8 \leq \gamma \leq 3$ . Pro střední hodnoty sil byla tato mezní hodnota určena v intervalu  $\gamma = 1,8 - 2,2$ . Pro maximální hodnoty sil byla tato mezní hodnota určena v intervalu  $\gamma = 2,0 - 3,0$ . Měření ukazuje, že tato mezní hodnota bude ležet spíše u nižších hodnot  $\gamma$ . V literatuře se tato hodnota uvádí kolem  $\gamma = 2,0$ . Pro ověření této hranice by bylo nutno provést měření ve větším rozsahu.

Impuls síly od druhého kolapsu je intenzivnější pro  $\gamma$  v intervalu  $0,5 \leq \gamma \leq 1$ . Pro hodnoty  $\gamma \geq 1$  je pak intenzivnější impuls síly od prvního kolapsu.

Čas mezi kolapsy s přibývajícím poměrem  $\gamma$  roste až do hodnoty odpovídající zhruba  $\gamma = 1$ . Nad touto hodnotou začne doba mezi kolapsy klesat.

Pro nižší hodnoty poměru  $\gamma < 1,5$  byl průběh posuvu bublinky směrem ke stěně v čase přibližně exponenciální. Pro hodnoty  $\gamma > 1,5$  byl průběh posuvu bublinky směrem ke stěně v čase přibližně lineární. Z hlediska průběhu vzniku bublinky a jejího kolapsu lze říci, že bublinky dále od stěny si lépe udržují sférický tvar. Naopak bublinky vznikající blízko u stěny či na jejím povrchu jsou značně deformované.

Při experimentech byly sledovány některé jevy provázející expanzi a kolaps bublinky jako jsou „Jet effect“, „Splash effect“ a Bjerknesova síla. „Jet effect“ byl

pozorován při každém měření, avšak ne vždy mohl být přesně identifikován. Nejlépe pozorovatelný byl v oblastech  $1,5 \leq \gamma \leq 2,5$ . Pro oblasti  $\gamma \geq 2,5$  byly pozorovány jen zárodky proudu tekutiny. Nedošlo však k plnému vyvinutí tohoto proudu směrem ke stěně. Naopak pro  $\gamma \leq 1,5$  byla již stěna natolik blízko, že nebylo možné „Jet effect“ pozorovat. Dalším pozorovaným jevem byl „Splash effect“ a to v oblasti  $0,5 \leq \gamma \leq 1$ . V průběhu kolapsů byla pozorována také Bjerknesova síla. Její vliv se vzrůstající vzdálenosti od stěny výrazně klesal.

Pomocí hydrofonu byly naměřeny tlaky generované v průběhu kolapsu. Hydrofon byl umístěn ve vzdálenosti 50 mm od místa vzniku bublinky. Největší tlaky byly naměřeny pro poměr  $\gamma = 0,5$  (3,5 bar).

Vznik bublinky byl iniciován pomocí elektrického výboje. Tento způsob generace bublin se ukázal být vhodný zejména pro dobrou opakovatelnost a možnost tvorby dostatečně velkých bublin. Nedostatkem tohoto způsobu generování bublin je přítomnost elektromagnetické interference, která zkresluje průběh signálu.

Výsledky řešení této práce najdou uplatnění například při vývoji čerpadel v Sigmě Lutín, která s TUL na výzkumu kavitace v čerpadlech dlouhodobě spolupracuje. Další možné využití pak představuje oblast vývoje numerických modelů pro simulace vícefázového proudění, ve kterých je důležitá znalost síly interakce bublinky se stěnou pro kvantifikaci poškození.

## 6. Seznam použité literatury

- [1] BLAKE, J. R. – GIBSON D. C. *Cavitation Bubbles Near Boundaries*. 1987, Ann. Rev. Fluid Mech, 99-123
- [2] BRENNEN, C.E. *An Introduction to Cavitation Fundamentals*. 2011, Invited Paper, WIMRC Forum 2011, Warwick University, UK.
- [3] BRENNEN, C. E. *Cavitation and Bubble Dynamics*. 1995, Oxford University Press, New York, NY
- [4] BRENNEN, C.E. *The amazing world of bubbles*, 2007. Engineering and Science, California Institute of Technology, LXX1, 30-41
- [5] FRANC J.P. - MICHEL J.M. *Fundamentals of Cavitation*. 2004, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht
- [6] KMÍNEK, Z. *Kavitace v uzavřených trubních systémech*. [online] . [cit. 15.05.2012]. Dostupný z www: <http://www.vakinfo.cz/konference-sovak-2009/kavitace-v-uzavrenych-trubnich-systemech-a-moznosti-jeji-eliminace>
- [7] MEASUREMENT SPECIALTIES, Inc, *Piezo Film Sensors Technical Manual*. 1999, P/N 1005663-1 REV B 02 APR 99
- [8] MÜLLER, M. *Dynamic behaviour of cavitation bubbles generated by laser*. 2008, Technická univerzita v Liberci, ISBN 978-80-7372-241-8
- [9] MÜLLER, M. - ZIMA, P. *Collapse of spark-generated cavitation bubble near a solid wall*. 2011, WIMRC 3rd International Cavitation Forum 2011
- [10] PHILIPP, A. - LAUTERBORN, W. *Cavitation erosion by single laser-produced Bubbles*. 1998, Cambridge University Press
- [11] SHENQ-YUH JAW, WHEY-FONE TSAI, ROBERT R. HWANG, *Cinematographic Analysis Of A Single Bubble Collapse Flow Induced By Pressure Wave*. 2009, Flucom 2009
- [12] WANG, Y. C., CHEN, Y. W. *Application of piezoelectric PVDF film to the measurement of impulsive forces generated by cavitation bubble collapse near a solid boundary*. 2007, Exp. Thermal Fluid Sci., 322, 403–414.
- [13] ZIMA, P. - SEDLÁŘ, M. - MARŠÍK, F. - MÜLLER, M. *Modeling of Cavitation Erosion Potential in Water Pumps*. 2008, HEAT 2008, Fifth International Conference on Transport Phenomena In Multiphase Systems

## 7. Seznam příloh

Experiment s PVDF filmem:

- Příloha 1.....kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=2$
- Příloha 2..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=2,1$
- Příloha 3..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=2,9$
- Příloha 4..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=1,4$
- Příloha 5..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=1,9$
- Příloha 6..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=2,6$
- Příloha 7..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=0,9$
- Příloha 8..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=1$
- Příloha 9..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=1,3$

Experiment s PVDF filmem a hydrofonem:

- Příloha 10.....kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=0,5$
- Příloha 11..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=0,64$
- Příloha 12..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=0,72$
- Příloha 13..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=0,83$
- Příloha 14..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=0,91$
- Příloha 15..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=1,15$
- Příloha 16..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=1,2$
- Příloha 17..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=1,33$
- Příloha 18..... kolaps kavitační bublinky v blízkosti pevné stěny pro  $\gamma=1,57$

